

INGRID RAQUEL NIELSEN

**UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMERCIAL DO HÍBRIDO DE
Eucalyptus urophylla S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex
Maiden NA CONFECCÃO DE VIGAS
LAMINADAS COLADAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de "Mestre em
Ciências Florestais - M. Sc.", no Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, do Setor
de Ciências Agrárias, da Universidade Federal
do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Graciela I. B. Muñiz

CURITIBA
1998



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pela candidata **INGRID RAQUEL NIELSEN**, sob o título "**UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMERCIAL DO HÍBRIDO DE *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* NA CONFEÇÃO DE VIGAS LAMINADAS COLADAS**", para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, com média final: (8,7), correspondente ao conceito: (A).

Curitiba, 25 DE SETEMBRO DE 1998

Pesq. Dr. José Carlos Duarte Pereira
Primeiro Examinador
EMBRAPA

Prof. Dr. Sidon Keinert Junior
Segundo Examinador
UFPR

Profa. Dra. Graciela Inez Bolzon de Muniz
Orientadora e Presidente da Banca
UFPR

“True merit, like a river, the deeper it is, the less noise it makes.”

Lord J. Halifax

A Deus,
pelos inúmeros momentos
de alegria e sucesso.

Aos Meus Pais,
Milton e Dirce,
pelo amor e dedicação.

Aos Meus Irmãos,
Karen, Erika e Niels,
por todos os momentos felizes.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Manoel de Freitas, pela amizade, incentivo e oportunidades durante toda minha vida acadêmica;

Ao amigo João Comério, pelo incentivo e confiança em mim depositada;

Aos amigos Eduardo Nogueira Campinhos e Robert Bruce Davis, pelo interesse e auxílio durante a realização desse trabalho;

Ao amigo Maurício Bueno Penteado, pela compreensão e incentivo sempre;

À amiga Claudia Maria Iannelli Servín, pela motivação, exemplo e valiosas conversas nos finais de tarde;

Aos amigos do Centro Champion de Tecnologia Florestal, pelo incentivo e interesse sincero;

Aos amigos do Curso de Especialização em Finanças Banking, Ana Lúcia, Fábio, Janete, Jocélia e Maura, pelo carinho, incentivo e por terem sido os melhores professores de finanças que eu poderia ter;

Aos Professores Graciela I. B. de Muñiz e Jorge L. M. de Matos, pela oportunidade de realizar esse curso de Mestrado;

Ao amigo Reinaldo A. Reichert Alberti, pelo companheirismo e valiosa presença durante todo o curso de Mestrado;

Ao amigo Ricardo Jorge Klitzke, pelas conversas e auxílio sempre presente;

Ao amigo Alexandre Florian da Costa, pelo incentivo e motivação;

Aos amigos Fernando dos Santos Gomes e Gilberto Tiepolo, pelo pronto auxílio sempre que solicitado;

Ao querido Niels Christian Samuel Nielsen, pelo companheirismo e registros fotográficos de todos os momentos desse trabalho;

Aos amigos Helder José dos Santos Francês e Vera Lucia Villas Boas, pelo carinho e por dividirem os solitários finais de tarde;

À Champion Papel e Celulose Ltda., pelo apoio irrestrito na realização do trabalho de dissertação;

Aos Srs. Ricardo Slavieiro, Arnaud Bonduelle e Pedro Câmaras, da empresa Marinepar Pisos Ltda., pelo valioso auxílio na secagem e aplainamento do material utilizado no estudo. A todos os funcionários da empresa, pelo auxílio prestado durante essa fase inicial;

Ao Dr. Adolphe Braunstein, ao Sr. Francisco Hess, da empresa Alba Química S.A., pelo pronto fornecimento do adesivo empregado na confecção das vigas laminadas coladas;

Aos Srs. Renato Kimio Koga e Luiz Gava, da empresa Emadel Engenharia e Obras Ltda., pelo valioso auxílio na confecção das vigas laminadas coladas. A todos os funcionários da empresa, pelo auxílio durante essa montagem;

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia da Madeira, pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento do trabalho;

Aos Professores do Curso de Engenharia Florestal do Paraná, pelos conhecimentos compartilhados;

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, que possibilitou a realização do Curso de Mestrado;

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro na realização do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. HISTÓRICO DA MADEIRA LAMINADA COLADA	3
2.2. VIGAS LAMINADAS COLADAS	5
2.3. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO COM MLC	6
2.4. PRODUÇÃO E DEMANDA DE VIGAS LAMINADAS COLADAS	8
2.5. MATERIAL GENÉTICO ESTUDADO	8
2.6. PROPRIEDADES ELÁSTICAS DA MADEIRA	10
2.7. FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DA MADEIRA	13
2.7.1. MASSA ESPECÍFICA	13
2.7.2. TEOR DE UMIDADE	14
2.7.3. TEMPERATURA	15
2.7.4. DEFEITOS DA MADEIRA	16
2.8. TEORIA INELÁSTICA	19
2.9. EMENDAS	20
2.10. ADESIVO	23
2.11. CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. ENSAIOS PRELIMINARES	27
3.1.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL	27
3.1.2. DESDOBRO E SECAGEM DO MATERIAL COLETADO	28
3.1.3. ANÁLISES FÍSICAS DO MATERIAL COLETADO	28
3.1.4. SELEÇÃO DO MATERIAL GENÉTICO	29
3.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES	29
3.3. CLASSIFICAÇÃO INICIAL	31
3.4. ENSAIO DO MATERIAL GENÉTICO	31
3.4.1. ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA DESTRUTIVO	32

3.4.2. ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA NÃO DESTRUTIVO	32
3.5. CONFECÇÃO DAS EMENDAS	35
3.6. ADESIVO	37
3.7. CLASSES DE VIGAS LAMINADAS COLADAS	39
3.8. CONFECÇÃO DAS VIGAS	39
3.9. TESTE DESTRUTIVO DAS VIGAS	41
3.10. ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. SELEÇÃO DO MATERIAL GENÉTICO BASEADA NOS TESTES PRELIMINARES	44
4.2. CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO MATERIAL ESTUDADO	46
4.3. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	51
4.3.1. CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITO	51
4.3.2. RESISTÊNCIA DAS TÁBUAS	54
4.3.3. TESTE DE RESISTÊNCIA DAS EMENDAS	55
4.3.4. VIGAS LAMINADAS COLADAS	57
4.3.5. MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR	61
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
6. ANEXOS	66
1. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS	67
2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE TUKEY	71
3. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA COMERCIAL	79
4. EQUAÇÕES DE MOE_{VIGAS} EM FUNÇÃO DO $MOE_{TÁBUAS}$	87
5. EQUIPAMENTO DE TESTE NÃO-DESTRUTIVO	91
6. EQUAÇÕES DE $MOE_{EMENDAS}$ EM FUNÇÃO $MOE_{TÁBUAS}$	94
7. RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES	99
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

01. Máquina de Ensaio de Flexão Estática Destrutivo - Corpos de Prova	34
02. Máquina de Ensaio para Teste de Flexão Estática Não-Destrutivo para Tábuas e Emendas	35
03. Encaixe Longitudinal Tipo “ <i>Finger joint</i> ” nas Peças de Madeira	37
04. Prensa de Madeira	40
05. Vigas Laminadas Coladas	40
06. Máquina de Ensaio Universal	42
07. Teste de Flexão Estática das Vigas	42
08. Detalhe do Deflectômetro	43
09. Distribuição da Densidade das Tábuas do Material Genético A	50
10. Distribuição da Densidade das Tábuas do Material Genético B	50
11. Valores Médios do Módulo de Elasticidade das Tábuas e das Tábuas com Emendas	57

LISTA DE TABELAS

01. Valores de Massa Específica Média (g/cm^3) dos Materiais Genéticos	8
02. Especificações e Características do Adesivo	11
03. Tempo Máximo de Montagem (Minutos)	12
04. Tempo Mínimo de Prensagem (Horas)	12
05. Valores de Massa Específica Média dos Oito Materiais Genéticos	45
06. Valores de Anisotropia de Contração, Anisotropia de Inchamento e Coeficiente de Retratabilidade	46
07. Valores Médios de Massa Específica Aparente, Massa Específica Básica e Coeficiente de Retratabilidade	47
08. Valores Médios de Anisotropia de Contração, Anisotropia de Inchamento, Contração e Inchamento Volumétricos dos Materiais Genéticos Selecionados	48
09. Valores Médios do Coeficiente de Retratabilidade dos Materiais Genéticos Selecionados	48
10. Frequência das Classes de Densidade das Tábuas por Material Genético	49
11. Valores Médios de Resistência à Flexão Estática dos Corpos de Prova do Material Genético A por Classe de Densidade	52
12. Valores Médios de Resistência à Flexão Estática dos Corpos de Prova do Material Genético B por Classe de Densidade	53
13. Resultados Máximos e Mínimos do Teste de Flexão Estática em Corpos de Prova Livres de Defeitos	53
14. Resultados do teste de Tukey das Classes de Densidade dos Materiais Genéticos A e B	54

15. Valores Médios de Resistência das Tábuas à Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo por Classe de Densidade e Resultado do Teste de Tukey para o Material Genético A	55
16. Valores Médios de Resistência das Tábuas à Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo por Classe de Densidade e Resultado do Teste de Tukey para o Material Genético B	55
17. Valores Médios de Resistência das Emendas das Lâminas ao Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo	56
18. Valores Médios de Resistência das Vigas Laminadas Coladas ao Ensaio de Flexão Estática para o Material Genético A	58
19. Valores Médios de Resistência das Vigas Laminadas Coladas ao Ensaio de Flexão Estática para o Material Genético B	58
20. Resultados do Teste de Tukey das Vigas Laminadas Coladas dos Materiais Genéticos A e B	59

RESUMO

Este estudo foi conduzido com o objetivo de produzir e avaliar o comportamento de vigas laminadas coladas horizontalmente, confeccionadas a partir de tábuas obtidas de madeira comercial de dois clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, provenientes de plantios do Estado de São Paulo. Essas tábuas foram classificadas de forma mecânica em ensaio de flexão estática não-destrutivo. Algumas propriedades de resistência mecânica e rigidez das tábuas foram avaliadas e correlacionadas com as propriedades das vigas no teste de flexão estática. Inicialmente foram testados corpos de prova livres de defeitos pelo teste de flexão estática. Esses resultados foram utilizados como subsídios para a determinação dos limites das classes de esforços, bem como, para a caracterização das propriedades mecânicas da madeira. As tábuas, que formaram as vigas, foram previamente classificadas por densidade e por módulo de elasticidade à flexão. Foi dada preferência a duas classes de densidade, por apresentarem maior número de tábuas. Foram elas: classe de densidade 2, variando de 0,61 a 0,65 g/cm³, e classe de densidade 3, de 0,66 a 0,70 g/cm³. Para cada material genético foram confeccionadas 18 vigas laminadas coladas, 9 vigas por cada classe de densidade. Foram obtidas equações que estimam o módulo de elasticidade das vigas em função das características das tábuas, para os materiais genéticos isolados e combinados entre si. O melhor modelo de regressão foi: $MOE_{VIGA} = -20.325 + 243.122 * DENS_{TÁBUA} + 0,1509 * MOE_{TÁBUA}$. A variável independente das equações que permite estimar o módulo de elasticidade das vigas é de fácil obtenção, possibilitando estimar previamente a rigidez das vigas a serem produzidas a partir das propriedades de rigidez das peças de madeira disponíveis. As vigas laminadas coladas de eucalipto, constituem um elemento estrutural de alta qualidade e resistência mecânica. Os excelentes resultados de resistência confirmam a viabilidade de utilização da madeira comercial de eucalipto para a confecção de elementos estruturais, ampliando as possibilidades de utilização de madeiras de reflorestamento.

ABSTRACT

This study has been made to verify the glued laminated beams behavior, which were made with hybrid *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *E. grandis* Hill ex Maiden wood, mechanically classified. Both board properties of mechanical resistance and rigidity and the beams properties of static strength test were analyzed and correlated. Initially resistance classes were determined with results of static strength tests, made with samples. Through nondestructive static strength tests the boards, that formed the beams themselves, were classified. To two density classes was given preference, once that they had more boards, which were density class 2 (0,61 - 0,65 g/cm³), and density class 3 (0,66 - 0,70 g/cm³). For each genetic material 18 glued laminated beams (9 beams per density class) were made. A difference in the beams resistance, according to the density classes of the boards that formed the respective beams, was noticed. The method used in this study made possible the development regress models, which estimate glued laminated beams resistance according to the previously determined boards properties. The best regress model was: $MOE_{BEAMS} = -20.325 + 243.122 * DENS_{BOARD} + 0,1509 * MOE_{BOARD}$. The equations independent variable, that estimate beams elasticity module, is easy to be obtained; therefore beams rigidity could be previously estimated from the boards rigidity properties. The *Eucalyptus* glued laminated beams are a high quality and high mechanical resistance structural element. The excellent resistance results confirm the viability of such use for this wood.

1. INTRODUÇÃO

Entre os principais e mais importantes materiais de construção, utilizados pelo homem, está a madeira. Em todas as civilizações, a madeira sempre se apresentou em papel de destaque e de grande importância. Atualmente não é diferente. A utilização da madeira em construções ou detalhes arquitetônicos é símbolo de prestígio e “*status*”.

A madeira, na construção, está presente na forma estrutural, em detalhes de interiores e em estruturas de exteriores. Suas inúmeras funções decorativas sempre foram exploradas, o que amplia suas possibilidades funcionais e estéticas.

Com o surgimento de novas tecnologias e aprimoramento das já existentes, tem-se verificado uma mudança no conceito estético e funcional da madeira que vem modernizando a construção. Um outro fator, que também tem influenciado essa mudança, é a escassez da matéria-prima normalmente utilizada.

Entre essas novas tecnologias, é possível destacar a técnica da madeira laminada colada, que vem ampliando as possibilidades de emprego da madeira estrutural, principalmente, por ser caracterizada pela produção de peças de formas e tamanhos variados, teoricamente, sem restrições.

A madeira comercial do híbrido *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *E. grandis* Hill ex. Maiden tem uma importância muito grande na produção de papel e celulose. Os plantios desse material genético são abundantes no Estado de São Paulo.

Devido à importância mundial dessa técnica e sua crescente utilização, o presente estudo procurou ampliar sua aplicação, utilizando a madeira de plantios comerciais de eucalipto.

O estudo teve por objetivo produzir e avaliar o comportamento de vigas laminadas coladas horizontalmente, confeccionadas a partir de tábuas obtidas da madeira comercial do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, classificadas pelo teste mecânico não-destrutivo.

Foram avaliados, além desse objetivo principal, os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar as propriedades mecânicas da madeira comercial do híbrido *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden;
- Classificar as tábuas em classes de resistência a partir de teste mecânico não-destrutivo;
- Determinar modelos de regressão que possam estimar as propriedades das vigas através das propriedades das tábuas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. HISTÓRICO DA MADEIRA LAMINADA COLADA

As primeiras construções laminadas coladas tiveram seu início na virada do século, quando a primeira patente desse método foi concedida na Alemanha. Rapidamente, esse sistema construtivo se espalhou por toda a Europa. O Sistema Hetzer, como era conhecido, caracterizava o gênero de extensões livres de construções em madeira laminada colada, curva ou reta, com vãos livres de até 43 metros. Em 1910, o Sistema Hetzer recebeu dois grandes prêmios na Exposição Mundial em Bruxelas e uma medalha de ouro na Exposição Mundial de Madeiras de Construção, realizada em Leipzig, Alemanha.

Em 1923, começaram os primeiros esforços para que essa técnica fosse conhecida e aceita nos Estados Unidos. A primeira obra de madeira laminada colada foi a construção de um ginásio de esportes na cidade de Peshtigo, Wisconsin, em 1934. A firma construtora era formada pelo alemão Max Hanisch, que trouxe a técnica da Europa, e os irmãos Thompson, construtores de barcos, que possuíam vasto conhecimento em madeira.

Hanisch sofreu muita resistência dos construtores locais para popularizar o uso da madeira laminada colada. Foi ridicularizado quando propôs a utilização de arcos de madeira com adesivo ao invés do aço. A indústria do aço tinha surgido no final do século 19 e tinha feito grande incursão na construção. Foi uma indústria que obteve apoio de grandes grupos construtores e financeiros.

Valorizando a resistência da madeira laminada colada, sua infinidade de aplicações e dimensões, seu aspecto decorativo, além do menor custo quando comparado com o aço, Hanisch foi tornando a técnica mais popular e ganhando admiradores.

Com a popularização da técnica outras empresas da construção começaram a produzir madeira laminada colada, bem como, melhorar a resistência e a qualidade do adesivo empregado.

Por esse motivo, era possível encontrar madeira laminada colada em ginásios, pavilhões, casas de campo e hangares de companhias aéreas. Os hangares estavam se tornando maiores devido ao maior porte das novas aeronaves, necessitando de reformas ou ampliações.

As construções em madeira laminada colada se espalharam por todos os Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial, onde se estima que, em 1942, 36.000 toneladas de aço estrutural foram poupados com o uso de madeira na construção. Entre suas características, os construtores destacavam a resistência e facilidade de trabalhar, simplicidade de transporte e instalação. Seu peso era consideravelmente menor do que o do aço, requerendo guindastes menores para levantar as peças.

Em 1950, as construções em madeira laminada colada eram conhecidas como produtos de construção de primeira classe, estando representada por todos os Estados Unidos. Fabricantes de produtos de madeira sólida e de madeira laminada criaram, em 1952, o American Institute of Timber Construction (AITC), que foi criado para uniformizar a indústria nacional e reunir esforços para campanhas promocionais.

Durante os anos da década de 1940, foram conduzidas extensivas pesquisas sobre esses produtos. Os resultados das pesquisas foram publicados em 1945, como USDA Technical Bulletin 1069, de autoria dos pesquisadores FREAS e SELBO. Esses resultados auxiliaram na confecção de normas técnicas, que ao longo dos anos foram revisadas e atualizadas, e continuam em uso até hoje.

No Brasil, em 1934, a primeira indústria brasileira de madeira laminada colada foi fundada em Curitiba - PR, a qual ainda se mantém em atividade em Porto Alegre - RS. Todos os trabalhos de confecção e execução de projetos são baseados em especificações e recomendações de normas alemãs (MANTILLA, 1989).

Nos institutos de pesquisa e universidades brasileiras é possível encontrar estudos de casos com madeira laminada colada. Algumas obras arquitetônicas com madeira laminada colada já podem ser vistas em algumas cidades brasileiras, conseguindo certa popularidade.

Em 1995, havia nos Estados Unidos aproximadamente trinta fabricantes de madeira laminada colada estrutural, muitos dos quais licenciados à AITC. A indústria de madeira laminada colada estrutural tem amadurecido e influenciado as construções em madeira em todo o mundo.

2.2. VIGAS LAMINADAS COLADAS

O termo madeira laminada colada aplicado a peças estruturais refere-se ao material colado de pequenas peças de madeira, com espessura variando de 10 mm a 50 mm, de forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao comprimento da peça. As lâminas podem ser de diferentes espécies de madeira, espessuras, larguras e comprimentos, que são coladas borda a borda obtendo peças de dimensões e qualidade desejadas. São características que proporcionam infinitas possibilidades de projeto, condicionadas apenas ao uso final e aos fatores econômicos de produção (FREAS & SELBO, 1954).

Viga laminada colada é uma peça estrutural formada por duas ou mais peças de madeiras, unidas por adesivo. As lâminas podem ser coladas na horizontal ou na vertical, formando laminados horizontais e verticais, respectivamente. O laminado horizontal é mais utilizado por não apresentar limitação de altura, além de possibilitar a construção de peças curvas. O sistema de emendas das extremidades permite que o conjunto dessas peças coladas funcionem como uma única unidade estrutural (LAHR, 1992).

Uma das características de peças laminadas coladas é a possibilidade da utilização racional e otimizada da madeira, permitindo a utilização de tábuas com seções e comprimentos variados, além de combinações com madeiras de qualidade diferenciada.

As operações fundamentais que caracterizam a tecnologia de fabricação de peças estruturais de madeira laminada colada são: secagem, preparação das lâminas, colagem e acabamento da peça.

As principais condições a cumprir na produção de peças estruturais são a temperatura e a umidade com valores preestabelecidos, assegurando durante a fabricação do material uma umidade adequada das peças de madeira. Segundo MANTILLA (1989), uma temperatura de 20°C e uma umidade relativa do ar entre 55% e 65% tornam possível esse controle.

Para a seleção da madeira utilizada na produção de peças laminadas coladas é necessário observar alguns fatores. É essencial definir o uso final do produto laminado, sua resistência, durabilidade, propriedades de adesão das espécies, teor de umidade e a qualidade da superfície preparada para colagem. Peças com defeitos que possam prejudicar a qualidade da colagem e reduzir a trabalhabilidade do produto acabado devem ser rejeitadas (MATSUNAGA, 1995). Também, é importante considerar a aparência da peça acabada e o posicionamento das lâminas de madeira.

2.3. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO COM MADEIRA LAMINADA COLADA.

A principal recomendação para o uso da madeira colada está baseada na comparação de suas propriedades com as de outros materiais construtivos. Podendo, dessa forma, destacar:

- Boa relação densidade x resistência;
- Bom módulo de elasticidade;
- Pequeno coeficiente de expansão e condutibilidade térmica;
- Boa resistência química à corrosão;
- Boa trabalhabilidade, linha de cola resistente;
- Disponibilidade de matéria-prima no mercado;
- Liberdade de formas e tamanhos.

A construção em madeira laminada colada apresenta algumas vantagens em relação aos demais sistemas construtivos (MATSUNAGA, 1995).

Dentre as quais podem ser destacadas:

- Melhor controle da umidade das peças e redução dos defeitos de secagem pela pequena espessura das peças que não ultrapassa 50 mm;
- Possibilita um dimensionamento mais preciso baseado na resistência da madeira seca, proporcionando economia no projeto;
- As grandes dimensões da seção transversal tornam a madeira laminada colada mais resistente ao fogo, do que as construções em aço projetadas para suportar o mesmo esforço.
- As estruturas de madeira laminada, quando expostas ao fogo, não entram em colapso como as de aço, queimam mais lentamente; resistem melhor à penetração de calor;
- As fundações são consideradas leves, permitindo pré-fabricação e montagem com número reduzido de mão-de-obra;
- Quando utilizada em interiores não necessita de manutenção. Quando utilizada em exteriores requer manutenções baratas.

Como desvantagens é possível destacar:

- Quando comparada com a madeira maciça, apresenta maior custo de produção, que inclui mão-de-obra, adesivo e seleção das peças de madeira;
- Durante a produção das peças ocorre uma perda de madeira e adesivo, pelas emendas, acabamentos e considerações de projeto, que variam de 13% a 33%;
- O adesivo utilizado deve ser adequado ao emprego final da peça;
- É necessário o emprego de técnicas e equipamentos específicos, bem como, mão-de-obra especializada;
- Peças de grandes dimensões, que não são fabricadas na obra, podem incluir no seu custo de produção o custo de transporte.

2.4. SITUAÇÃO ATUAL DA PRODUÇÃO E DEMANDA DE VIGAS LAMINADAS COLADAS.

Na Tabela 01, são apresentados alguns dados estimados de produção e demanda de vigas laminadas coladas na América do Norte, para o período de 1997 a 2001.

Tabela 01. PRODUÇÃO DE VIGAS LAMINADAS COLADAS NA AMÉRICA DO NORTE (EM MILHARES DE METROS CÚBICOS).

Vigas Laminadas Coladas	1997	1998	1999	2000	2001
Residenciais	4.100	4.950	4.810	4.950	5.100
Estrutural	260	290	290	290	320
Não-Residencial	2.540	2.590	2.480	2.620	2.740
Industrial	260	290	230	260	290
Exportação	2.040	2.620	3.060	3.640	4.225
Total EUA	9.200	10.740	10.870	11.760	12.675
Produção no Canadá	640	900	1.020	1.165	1.310
TOTAL GERAL	9.840	11.640	11.880	12.925	13.985

* Fonte: APA - The Engineered Wood Association (1997).

2.5. MATERIAL GENÉTICO ESTUDADO

A espécie *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ocorre nas regiões costeiras da Austrália em Newcastle, ao norte de Nova Gales do Sul, no sudeste de Queensland em pequenas áreas próximas a Mackay e no planalto de Atherton. A ocorrência principal está situada entre 26° e 32° de latitude Sul, na região central de Queensland a 20° S e ao norte de Queensland a 17° S. (BOLAND *et al*, 1992).

Ocorre entre 0 e 500 m de altitude em Nova Gales do Sul, e entre 800 e 1.000 m no planalto de Atherton. O clima é predominantemente subtropical na região norte, e temperado no limite sul da ocorrência natural.

Nas regiões costeiras não ocorrem geadas, algumas geadas ocasionais ocorrem longe da costa em altitudes mais elevadas. O regime de chuvas é estacional de verão, com precipitação anual total de 1.000 a 1.700 mm, sendo a precipitação do mês mais seco superior a 25 mm (BOLAND *et al*, 1992).

A espécie *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake é nativa da Indonésia e de outras ilhas ao norte do Continente Australiano, Papua Nova Guiné, Filipinas, Timor. Ocorre, principalmente, entre 7° e 10° de latitude Sul e 122° a 127° de longitude Leste. A espécie é encontrada com maior frequência em altitudes de 500 m, podendo ocorrer em locais de até 3.000 m de altitude. O clima é tropical a subtropical úmido. As médias de temperatura do mês mais frio e mais quente é 10°C e 29°C, respectivamente. As geadas ocorrem somente em áreas altas. A precipitação anual é de 1.000 a 1.500 mm, com regime de chuvas estacionais de verão (BOLAND *et. al*, 1992).

As espécies de eucalipto apresentam fecundação cruzada, facilitada por mecanismos de auto-incompatibilidade e depressão por endogamia, além de hibridação interespecífica natural. Os eucaliptos, também, apresentam um sistema misto de cruzamento, com alogamia predominante e níveis de autofecundação (PRYOR, 1979, citado por CAMPINHOS, 1996).

As espécies *E. grandis* e *E. urophylla* e o seu híbrido são de grande importância para a produção de papel e celulose de fibra curta no Brasil. O termo híbrido para essências florestais, e mais especificamente para eucalipto, é utilizado para designar cruzamentos interespecíficos, podendo também ser usado para cruzamentos intra-específicos (BERTOLUCCI *et al*, 1993, citado por CAMPINHOS, 1996).

A hibridação apresenta a vantagem de permitir a obtenção de indivíduos parcial ou inteiramente diferentes, pela combinação de construções genéticas distintas, produzindo novos genótipos, adaptados a ambientes diversos, como resultado da fusão de dois complexos gênicos parentais distintos (MARTINS e IKEMORI, 1987, citados por CAMPINHOS, 1996).

2.6. PROPRIEDADES ELÁSTICAS DA MADEIRA.

A madeira apresenta três eixos mutuamente perpendiculares de simetria elástica, os quais são considerados correspondentes às direções longitudinal, tangencial e radial. Dessa forma, a direção da grã (L) é a direção da maioria das células, a qual é paralela ao comprimento da tora. A direção radial (R) acompanha o sentido dos raios, perpendicularmente aos anéis de crescimento. A direção tangencial (T) é perpendicular aos raios ou tangente aos anéis de crescimento (CHUNG, 1964).

Um material que possui três planos de simetria elástica, perpendiculares entre si, é designado de sólido ortotrópico. Na madeira, a simetria já existe a nível macroscópico, como consequência do arranjo dos elementos anatômicos. A caracterização mecânica ou caracterização de elasticidade dos materiais ortotrópicos pode ser feita por intermédio de tensões, chamadas matrizes-tensor. Esse recurso emprega o cálculo matricial e tensorial para a descrição de um sistema físico, simplificando-o no caso de materiais ortotrópicos, em razão de sua simetria interna (LAHR, 1983).

A propriedade elástica é característica de corpos sólidos, abaixo de um certo limite de esforço. Para muitos materiais, inclusive a madeira, a relação entre tensão e deformação é linear até um certo ponto. Este ponto é chamado de limite proporcional ou limite elástico. Na prática, o limite proporcional de um material é determinado no diagrama de tensão x deformação (TIMOSHENKO, 1971).

O ponto, no diagrama, onde a linha começa a curvar-se perceptivelmente é o limite proporcional. Acima deste limite, aumentos de tensão resultarão em deformações não proporcionais até a ruptura do corpo.

A relação entre as cargas aplicadas e as deformações correspondentes até o limite proporcional é expressa pela lei de Hooke. Até o limite proporcional a madeira deforma-se segundo essa lei. Portanto, os diagramas de tensão x deformação da maioria dos materiais estruturais apresentam uma região inicial do comportamento elástico e linear.

Quando um material se comporta elasticamente e apresenta, também, uma relação linear entre tensão e deformação, diz-se que é linearmente elástico (BODIG & JAYNE, 1982). Esta é uma propriedade extremamente importante de muitos materiais sólidos, entre eles a madeira.

Elasticidade é a propriedade que um corpo sólido possui de retornar a seu estado inicial, de forma e tamanho, quando o esforço causador dessa deformação e tensão é removido (KOLLMANN, 1959). As deformações são elásticas e ocorrem abaixo do limite proporcional. Acima deste limite, as deformações são chamadas plásticas e permanecem mesmo após a remoção do esforço.

Resistência é a capacidade de um material resistir a força, cargas externas ou aplicadas, a choques ou esforços que tendem a alterar sua forma e tamanho, ou ainda, causar alguma deformação.

Uma carga aplicada a um corpo sólido infere um esforço interno, que tende a resistir às alterações no seu tamanho e forma. Este esforço é conhecido como tensão, geralmente expresso em kgf/cm^2 . As alterações de forma e tamanho são conhecidas como deformação. O valor da resistência de uma peça qualquer é, portanto, numericamente igual à carga máxima antes da ruptura (BENDTSEN, 1978).

O comportamento elástico e o limite de resistência são características próprias de cada material e nas madeiras dependem de cada espécie. A determinação dessas características pode ser obtida na prática através dos ensaios convencionais, realizados dentro dos padrões estabelecidos por normas ou especificações. Em geral, os ensaios consistem na obtenção de dados da deformação correspondente à aplicação de um carregamento lento e contínuo em corpos de prova devidamente preparados e condicionados a um determinado teor de umidade.

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young (MOE ou E), expressa um valor hipotético pelo qual um corpo de 1 cm^2 de área transversal pode ser estendido ao dobro do seu comprimento original.

Na realidade o valor “E” não pode ser atingido, pois ocorre antes disso a ruptura do material. Em testes de flexão estática, a determinação do módulo de elasticidade pode ser feita com a parte reta da linha descrita pelas avaliações de carga x deformação no limite proporcional ou limite elástico (KOLLMANN & COTÊ Jr., 1968).

Portanto, o módulo de elasticidade é uma medida de rigidez e não de resistência. Um alto módulo de elasticidade indica a rigidez de um corpo, e que pode suportar um grande esforço sem grandes deformações. O índice de rigidez da madeira é a medida de sua aptidão a resistir à deformação imposta pela carga. Desta forma, em termos práticos, um material difícil de curvar ou deformar pode ser chamado rígido.

Por outro lado, um material fácil de curvar sem quebrar, é dito flexível. A rigidez é expressa numericamente através do módulo de elasticidade, em testes de flexão estática, com dois apoios e um ponto de aplicação de carga (WANGAARD, 1950). Dessa forma, a rigidez é uma função do módulo de elasticidade e da dimensão da seção transversal da peça estrutural.

O módulo de elasticidade pode ser obtido tanto nos ensaios de flexão estática, como nos de tração e compressão. Os valores encontrados são relativamente próximos. Nos testes de flexão estática são um pouco menores do que os resultados dos outros tipos de testes, razão pela qual constitui-se o método mais empregado mundialmente para a obtenção do módulo de elasticidade (KOLLMANN & COTÊ JR., 1968).

O módulo de elasticidade em flexão tem sido referido como o melhor parâmetro estimador da resistência da madeira, embora existam outras variáveis que possam ser empregadas. O nível de relacionamento entre o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura, verificado em quatro espécies comerciais dos Estados Unidos, indicaram significativos coeficientes de correlação, todos entre 0,7 e 0,8, demonstrando um importante relacionamento linear entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação igual a uma unidade significa um perfeito relacionamento entre as variáveis (HOYLE, 1961).

WANGAARD (1950), comenta que a resistência de uma viga de madeira à ruptura é medida através da carga por unidade de área expressa através do módulo de ruptura (MOR). Este valor, quando calculado através de testes de flexão estática, exprime o esforço máximo nas fibras superiores ou inferiores da seção transversal da viga ou do corpo de prova. Os valores de ruptura são utilizados para a derivação das tensões admissíveis para os diversos tipos de esforços solicitantes.

Para vigas de madeira de baixa qualidade, portanto, com baixa resistência à tração, a ruptura ocorre antes da plastificação da região de compressão da viga. A relação carga x deformação é linearmente distribuída até um ponto, onde ocorre a ruptura brusca. Materiais com esse comportamento são considerados quebradiços (SIMIONI, 1978).

2.7. FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DA MADEIRA.

2.7.1. Massa Específica.

A massa específica é o melhor e o mais simples índice de resistência para madeiras sem defeitos. Com o aumento da massa específica a resistência também aumenta. Isto ocorre porque a massa específica mede a quantidade de madeira em um dado volume. Maiores massas específicas derivam de uma maior proporção entre células com paredes grossas e lúmens pequenos, resultando madeiras mais densas, livres de defeito, com uma maior resistência (BARTZ, 1974).

A relação entre massa específica com as propriedades e espécies varia de forma diferenciada, mas na maioria dos casos a relação é linear. As diferenças entre as espécies ocorrem por diferentes conteúdos celulares e diferentes extrativos; a resistência reduz quando os extrativos são removidos (KOLLMANN, 1959).

A relação geral entre a massa específica e a resistência é bem estabelecida para a madeira. A grande variabilidade da madeira pode ser expressa pelas variações da massa específica. As propriedades de resistência da madeira dependem da quantidade de material lenhoso presente.

A relação entre massa específica e as diversas propriedades têm seus valores de resistência aumentados com o incremento da massa específica, sendo que essa relação é mais acentuada para madeiras secas do que para as verdes (TSOUMIS, 1991).

A variabilidade entre a massa específica básica, peso seco e volume verde, e o Módulo de Young é mais acentuado para folhosas do que para coníferas. A relação entre a massa específica e o Módulo de Young apresenta-se de forma linear; o Módulo de Rigidez aumenta com o aumento da massa específica (GERHARDS, 1970).

2.7.2. Teor de Umidade

A umidade tem grande efeito sobre as propriedades das madeiras. Com o aumento da umidade, diminui a resistência, até ser atingido o ponto de saturação das fibras (PSF), acima deste ponto a resistência mantém-se constante. Essa variação de resistência ocorre quando a madeira apresenta uma umidade entre 2% e 30% (CARRASCO, 1989).

A variação abaixo de 25% de umidade pode ser representada por uma lei logarítmica ou, aproximadamente, por uma lei linear. Acima do ponto de saturação das fibras, 30% de umidade, o volume e o massa específica da madeira não são influenciados pelo teor de umidade, resultando uma resistência praticamente constante. Com a secagem da peça abaixo do ponto de saturação das fibras, observa-se redução de volume, aumento da massa específica e da resistência (SANTINI, 1980).

A variação da umidade influencia de forma diferenciada as várias propriedades. De acordo com estudos realizados por TSOUMIS (1991), uma variação de 1% na umidade altera a resistência à compressão axial em 6%, o módulo de ruptura (MOR) em 5%, a dureza em 2,5 a 4%, sendo maior na direção axial, o módulo de elasticidade (MOE) em 2%, para flexão estática. Uma exceção é a dureza, que não aumenta com o decréscimo da umidade mas algumas vezes diminui em madeiras secas.

A dureza não é somente afetada pela amplitude do esforço, mas também pela rigidez da madeira. Madeiras secas podem suportar maior carga, fletindo menos antes de quebrar.

Em geral, verifica-se uma mudança na resistência do material com a alteração do seu teor de umidade. Verifica-se, ainda, uma tendência similar para a maioria das propriedades de resistência, onde a magnitude varia de uma para outra. Por exemplo, a resistência à compressão usualmente altera-se mais do que à flexão, que por sua vez muda mais que o módulo de elasticidade à flexão (CALLIA, 1961).

É importante salientar que eliminar a umidade sem conseqüências adversas, como fendas, rachaduras e defeitos de secagem, é pré-requisito para obter ganhos na resistência. De outra forma a resistência sofrerá redução. A resistência da madeira pode ser dobrada quando o teor de umidade é reduzido abaixo do ponto de saturação das fibras. Teoricamente, a resistência de madeiras secas em estufa pode dobrar novamente (KOLLMANN, 1959).

2.7.3. Temperatura

Em geral, a resistência da madeira é reduzida com o aumento da temperatura. Essa redução é influenciada por alguns fatores, como: teor de umidade da madeira, nível da temperatura e tempo de exposição ao calor, tipo de carga, espécie da madeira e dimensões das peças estruturais de madeira (TSOUMIS, 1991).

Maiores valores do módulo de elasticidade estão relacionados a baixas temperaturas; portanto, temperaturas maiores que a ambiente (20°C), diminuem esses valores.

O efeito da umidade é respectivamente oposto, altos teores de umidade possuem um efeito de acréscimo com baixas temperaturas e um efeito de decréscimo da resistência com altas temperaturas (WOOD HANDBOOK, 1987). Acima do ponto de saturação das fibras, baixas temperaturas também possuem esse efeito de acréscimo. Aumentando a temperatura, o módulo de elasticidade sofre uma redução que é ainda mais evidenciada com altos teores de umidade. As variações nas propriedades de resistência serão maiores se o teor de umidade for alto e menores se o teor de umidade for baixo.

Várias propriedades são afetadas pela temperatura em diferentes níveis. A dureza é especialmente sensível. A baixos teores de umidade ela é reduzida, e a altos teores de umidade, e com temperaturas crescentes, ela sofre um acréscimo.

De modo geral, a maioria das propriedades é afetada pelas mudanças de temperatura, havendo redução da resistência com sua elevação e aumento da resistência com sua diminuição, estando a magnitude das alterações relacionada positivamente com o teor de umidade da madeira (KOLLMANN & COTÉ Jr., 1968).

Temperaturas maiores que 106 °C, obtidas através de tratamentos com vapor super aquecido, afetam mais adversamente as propriedades de resistência. A diminuição das propriedades de resistência são menores quando utilizado material de alta densidade.

A duração do calor é muito importante. Temperaturas menores do que 100°C não têm um efeito adverso quando a madeira é exposta por um curto período de tempo, enquanto que temperaturas maiores do que 65°C podem apresentar um efeito adverso permanente de acordo com o tempo de exposição ao calor.

Uma temperatura de 200°C, segundo TSOUMIS (1991), irá reduzir a resistência em poucos minutos. Segundo o mesmo autor, o efeito degradante de longa duração ocorre devido a decomposição química da madeira .

2.7.4. Defeitos da Madeira.

Os defeitos apresentados pela madeira podem reduzir a sua resistência; o grau dessa influência depende do tipo, tamanho e posição do defeito. Dentre os defeitos mais importantes que reduzem a resistência estão: nós, inclinação da grã, lenho de compressão e duração de carga. De forma secundária aparecem outros fatores como ataques de fungos ou insetos que causam a deterioração da madeira.

- Nós

A existência de nós na madeira implica em diferentes desvios dos seus tecidos componentes, da grã, da distribuição e da variação da massa específica, de irregularidades nos anéis de crescimento e, com freqüência, descontinuidade entre o nó e a madeira circundante, resultando de maneira geral em diminuição da sua resistência (TSOUMIS, 1991).

O efeito dos nós na resistência de peças estruturais depende de seu tamanho em relação à seção transversal da peça. Desta forma, é mais desejável a ocorrência de nós pequenos e freqüentes do que grandes e menos freqüentes, particularmente se ocorrerem em verticilos. Nós com diâmetros maiores do que a metade da espessura da peça podem reduzir sua resistência em até 50%, dependendo da sua localização e tipo de esforço (MATSUNAGA, 1995).

As propriedades elásticas da madeira são influenciadas de forma considerável pelos nós, assim como pela grã reversa. O módulo de elasticidade decresce com o aparecimento de nós em madeiras.

Em peças estruturais sujeitas à flexão estática, os esforços são maiores na porção média do comprimento e nas partes extremas de altura. Por esta razão, os efeitos dos nós sobre a resistência são maiores quando localizados nas partes mencionadas (KOLLMANN & COTÊ Jr., 1968).

No caso da flexão, os nós situados na região do eixo neutro têm pequena influência, enquanto que os situados próximos ao bordo tracionado reduzem sensivelmente a resistência. De forma geral, os nós afetam de forma mais adversa as peças de madeira quando estão localizados na sua superfície do que no seu interior (PFEIL, 1994).

- Inclinação da Grã

Em materiais isotrópicos as constantes elásticas e as propriedades de resistência são iguais em todas as direções, mas para materiais anisotrópicos, as constantes elásticas e outras propriedades mecânicas variam com a direção relativa da grã (CHUNG, 1964).

A inclinação da grã é a medida de desvio dos tecidos componentes da madeira em relação ao eixo longitudinal da peça. Se uma peça contendo tecidos axiais em um determinado ângulo de eixo longitudinal é sujeita aos esforços de tração ou compressão, o efeito dos componentes de força acompanha a direção da grã e a madeira se torna mais fraca nesta direção do que ao longo do eixo longitudinal da peça (KOLLMANN, 1959).

Considera-se, normalmente, que o efeito da inclinação da grã sobre as propriedades de resistência é maior em peças estruturais do que em pequenos corpos de prova. O módulo de elasticidade é reduzido pela inclinação da grã, mas o efeito mais acentuado aparece no esforço de dureza. A orientação da grã, excluindo-se os nós, e a massa específica são as responsáveis pela maior parte da variação da resistência da madeira (TSOUMIS, 1991).

- Lenho de Compressão

O lenho de compressão apresenta baixo módulo de elasticidade, baixa resistência à flexão estática e dureza. A relação da resistência com a densidade e umidade, que é aplicada para madeiras de estrutura anatômica normal, não é aplicada para o lenho de compressão da mesma espécie.

Em geral, essas anormalidades podem ser consideradas como efeitos negativos na resistência, e devem ser evitadas em peças estruturais. O lenho juvenil, também, reduz a resistência da madeira (WOOD HANDBOOK, 1987).

- Duração da Carga

A capacidade de carga que uma estrutura pode suportar tem uma influência importante na resistência da madeira. Por essa razão, resultados de testes de laboratórios, baseados na aplicação de carga de poucos minutos ou segundos, possuem apenas valores comparativos e são aplicados na prática apenas depois de corrigidos (TSOUMIS, 1991).

A mudança na resistência em relação ao tempo é influenciada pelo tipo de esforço, que pode ser permanente ou periódico. A madeira sob ação de cargas permanentes exibe o fenômeno denominado "creep", caracterizado por uma crescente deformação da estrutura sob ação de esforço permanente com a passagem do tempo (PFEIL, 1994).

Esse efeito é diferente da fadiga, causada por cargas periódicas. Em ambos os casos, a resistência é reduzida. Estudos sobre o assunto, têm mostrado que esforços permanentes reduzem a resistência em 50% a 75% de valores obtidos em testes estáticos de curta duração. Cargas ou esforços periódicos possuem uma influência similar, mas a resistência residual, limite de resistência, pode ser menor do que 25% desses valores estáticos (PFEIL, 1994).

Em geral, o comportamento da madeira, em relação à duração do esforço, é influenciado por vários fatores relacionados à madeira, entre eles a espécie, a densidade, a umidade e as condições de carregamento, que são a amplitude da carga, sua duração, ritmo de mudanças, etc.

A resistência à fadiga aumenta com a densidade. O fenômeno “creep” aumenta com o teor de umidade e com a temperatura (TSOUMIS, 1991).

2.8. TEORIA INELÁSTICA

SIMIONI (1978), cita que para as análises inelásticas de flexão de vigas de madeira são utilizadas as seguintes suposições:

- As tensões resultantes de uma carga na seção estão linearmente distribuídas;
- A ruptura ocorre quando é atingida a carga máxima na fibra extrema;
- As lâminas de madeira deverão ser livres de qualquer defeito, caso contrário afetarão as suposições anteriores.

Essa teoria falha em não explicar a variação do módulo de ruptura com a altura, forma da viga de madeira e outros pontos comuns à teoria elástica (SIMIONI, 1978).

Os estudos e dados de resistência mostram que a resistência à flexão de uma viga diminui com o aumento de sua seção. A teoria estatística da resistência foi utilizada para explicar a variação do módulo de ruptura das vigas de madeira com altura e forma de seção (NEWLIN & TRAYER, 1924).

A teoria supõe que a ruptura de uma madeira ocorre quando a tensão for igual à tensão que provocaria a ruptura em uma parte fraca ou debilitada da viga, se essa fosse testada independentemente do conjunto. Essa teoria assume a existência de uma região debilitada onde a ruptura, uma vez iniciada, se propaga com a aplicação contínua da carga (SIMIONI, 1978).

BOHANNAN (1966), concluiu que o efeito da seção da viga sobre o módulo de ruptura é dependente do comprimento e da altura da viga, bem como do método de aplicação da carga, independendo da largura da viga. Verificou, ainda, que vigas de madeira com duas cargas iguais, distribuídas simetricamente, terão um módulo de ruptura mais baixo quando comparadas a vigas de igual volume com carga no meio do vão.

2.9. EMENDAS

Durante o processo de fabricação da madeira laminada colada são feitas emendas nas extremidades das tábuas, unindo-as, com o objetivo de conseguir o comprimento final desejado da peça. Poucos tipo de emendas são utilizados na produção dessas peças, existindo, porém, muitas variações desses tipos principais. As emendas realizadas em peças pequenas de madeira acarretam alto custo de produção e grande desperdício. Geralmente, as emendas mais eficientes utilizam maior quantidade de madeira na sua produção (CHUNG, 1964).

Nesse estudo foram utilizadas as emendas dentadas. Existem dois tipos de emendas dentadas: o estrutural com dentes compridos e pontas finas, e o não-estrutural, com dentes menores e pontas mais largas. Nas emendas, é conseguida maior resistência quanto maior for a área de colagem e com dentes de pontas finas. Para a execução de dentes finos é necessário utilizar fresas bem afiadas, e também requer maior cuidado no corte, além de sua execução ser mais cara. Por esses motivos, são preferidos dentes mais curtos com pontas largas (ZANDER, 1979).

A orientação dos dentes na seção pode ser de três formas:

- Perpendiculares (Verticais): o perfil é visível na face maior da peça encaixada;
- Paralelos (Horizontais): o perfil é visível na face menor da peça encaixada;
- Inclínadas: o perfil é visível nas duas faces da peça encaixada.

A orientação perpendicular possui uma resistência à flexão 9% maior do que a orientação paralela. O corte do dente na orientação paralela é mais fácil de executar e mais utilizado. A orientação inclinada é de 45°, e proporciona obtém resultados de resistência superiores aos demais tipos apresentados.

A alta resistência das emendas representa um fator importante nas construções com laminados e depende de algumas condições, alcançadas pela técnica eficiente de colagem. As emendas devem oferecer segurança e credibilidade às peças laminadas (MACEDO, 1996).

Entre os procedimentos e cuidados necessários, para assegurar a produção de emendas estruturalmente adequadas, é possível destacar:

- O teor de umidade da madeira, no momento da colagem das emendas denteadas, deve estar entre 8% e 18%, e a diferença de umidade entre as duas partes da emenda não deve exceder 5%, salvo as especificações dos fabricantes;
- A geometria de 20 mm de comprimento é considerada adequada, por se tratar de um perfil de emenda consagrado e amplamente utilizado na tecnologia da madeira laminada colada;
- As pressões de colagem recomendadas são $0,80 \text{ kN/cm}^2$ e $1,00 \text{ kN/cm}^2$, para coníferas e folhosas, respectivamente. Pressões excessivas podem causar pequenas fendas no fundo das emendas, que aumentam a pressão sob os flancos dos dentes provocando até mesmo a ruptura da emenda. O tempo de duração da pressão de colagem não deve ser inferior a dois segundos;
- O ensaio de tração é muito mais crítico e a linha de cola é mais uniformemente tensionada, menos influenciada pelas variações das propriedades da madeira, além de apresentar menores resultados de resistência, sendo mais adequado;
- As emendas devem ser inspecionadas, através de indicações de colagem deficiente e se possível testadas.

A utilização de qualquer tipo de emenda em áreas de momentos máximos deve ser evitada. Um aumento significativo da resistência à flexão pode ser obtido com uma atenção especial às lâminas externas da viga. De forma geral, o emprego de lâminas externas de melhor qualidade resulta em vigas significativamente mais resistentes.

Entretanto, a primeira lâmina, após as lâminas externas, na região de tração é considerada como uma possível fonte de ruptura. As emendas das peças laminadas apresentam uma eficiência de até 80% se comparadas com a resistência de peças sem emendas (SZÜCS, 1992).

A ruptura em vigas de madeira laminada pode ocorrer de três formas: ruptura em compressão, ruptura através de fator redutor de resistência nas lâminas externas tracionadas e ruptura em juntas longitudinais nas lâminas externas ou internas (BOHANNAN, 1966).

É impossível controlar, em escala comercial, o posicionamento das emendas dentadas dentro de uma viga. MOODY e BOHANNAN (1971) pesquisaram o efeito das emendas dentadas, posicionadas na região crítica, em lâminas externas de vigas laminadas de Southern Pine. Concluíram que o valor do módulo de ruptura, para as vigas com emendas denteadas posicionadas na região crítica, foi ligeiramente menor do que para as sem emendas na região crítica.

Entretanto, uma análise de variância desses dados indicou que esta diferença não foi significativa ao nível de 95% de probabilidade. O valor do módulo de elasticidade permaneceu igual nos dois grupos analisados. A ruptura das vigas testadas foi atribuída a fatores redutores de resistência e não às emendas denteadas. É importante ressaltar a necessidade de um controle de qualidade rígido das emendas, para que essas observações sejam verdadeiras.

2.10. ADESIVO

A característica esperada do adesivo, utilizado em peças laminadas coladas, é que proporcione resistência de colagem e durabilidade, possibilitando às peças laminadas atuarem como uma única unidade estrutural por todo seu tempo de vida útil. Dessa forma, os adesivos utilizados não devem causar danos ou diminuir a resistência da madeira, permitindo as operações de produção sem dificultar ou causar danos aos equipamentos de aplainamento (FREAS & SELBO, 1954).

Existem dois tipos de colas específicas para esse produto, as que são curadas a calor e as resinas termoplásticas. As colas curadas a calor não amolecem com o aumento de temperatura.

As resinas termoplásticas não apresentam solidificação permanente, podem amolecer ou dissolver com o aumento da temperatura, retornando ao estado rígido quando ocorre o resfriamento. Esse processo de solidificação reversível é recomendado para processos que envolvem reações químicas.

O adesivo aplicado em vigas laminadas de madeira deve possibilitar à peça estrutural a capacidade de resistir às mais rigorosas condições de exposição. A peça deve apresentar resistência à intempéries, a variações de temperatura, ataques de fungos e insetos, e ser inerte à corrosão química. Outra qualidade requerida ao adesivo é que sua resistência seja maior ou igual a da madeira, bem como sua durabilidade (CHUNG, 1964).

A resina resorcinol tem sido a mais empregada na produção de peças laminadas coladas. Essa resina é capaz de resistir à severas condições de exposição, calor e umidade. A resistência da linha de cola é determinada pela habilidade da madeira em resistir às condições de exposição, desde que a madeira seja de boa qualidade. Essa propriedade de resistir a severas exposições faz dos adesivos resorcinólicos os indicados para uso em pontes, pequenos navios, construções estruturais de grande porte, etc.

A cura do adesivo acontece com temperaturas de até 21°C; seu tempo de vida útil em serviço é de 2 a 4 horas, na mesma temperatura. Para madeira de folhosas, o período de montagem deve ser ajustado para dar maior viscosidade ao adesivo e, conseqüentemente, apresentar menor fluidez quando for aplicada a pressão.

A eficiência do adesivo depende grandemente da preparação da superfície da madeira a ser colada. Antes da colagem, as superfícies devem ser aplainadas com equipamentos que produzam um corte limpo, sem comprimir ou danificar as fibras. Essa operação deve ser efetuada no máximo 48 horas antes da colagem para que não haja aderência de substâncias estranhas na superfície, bem como, alterações de umidade (CHUNG, 1954).

2.11. CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A prévia classificação das peças de madeira tem por objetivo o controle de qualidade das peças individuais de acordo com sua resistência a esforços submetidos. Para essa classificação, são elaboradas classes de resistência que possam ordenar as peças segundo seus esforços, em vários intervalos, definindo sua qualidade.

Os métodos de classificação avaliam e quantificam os defeitos de várias naturezas sobre a resistência das peças. Esses métodos podem ser destrutivos e não-destrutivos. A avaliação não-destrutiva de materiais é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça do material, sem alterar sua capacidade de uso final (ROSS & PELLERIN, 1994).

- Ensaio Não-Destrutivo - Classificação Mecânica

Os métodos mecânicos, realizados por uma máquina de classificação, foram os pioneiros e mais populares testes não-destrutivos. Na classificação mecânica não-destrutiva, a influência dos defeitos presentes na viga pode ser avaliada pela deformação resultante da aplicação de uma carga de prova em teste de flexão estática. Uma das vantagens, que esse método apresenta, é a rapidez nas operações de classificação. Essa classificação está baseada no princípio de correlação entre a resistência, representada pelo módulo de ruptura, e a elasticidade da madeira em teste de flexão estática, representada pelo módulo de elasticidade (BOSTRÖM, 1994).

Na classificação mecânica a viga é flexionada por poucos instantes, o necessário para medir o seu valor de rigidez. Baseado nesse valor, é possível estimar a resistência à flexão da peça pela correlação entre os módulos de elasticidade e de ruptura, bem como, da existência dessa correlação (ALEXANDER & ANTON, 1977).

Muitos estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o nível de correlação entre os parâmetros destrutivos e não-destrutivos para várias espécies de madeira, coníferas e folhosas. O grau de correlação entre esses parâmetros pode ser avaliado pelo coeficiente de correlação da regressão linear. Os valores encontrados para os coeficientes de correlação entre o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade, nesses estudos, variavam de 0,68 a 0,87 (KRAMER, 1964).

O parâmetro não-destrutivo mais utilizado em classificação mecânica tem sido o módulo de elasticidade, algumas vezes associado à massa específica aparente como outra variável independente na mesma equação. Na elaboração de classes de esforços para classificação mecânica de vigas de madeira para fins estruturais, é possível adotar o conceito básico de que a resistência da viga de uma determinada espécie é proporcional à resistência dos corpos de prova livres de defeitos. Os valores de MOR e MOE obtidos para os corpos de prova livres de defeitos podem ser utilizados para a determinação dos valores correspondentes aos limites das classes de esforços (SENFT & DELLA LUCIA, 1979).

Essas classes de esforços são ordenadas em intervalos pré-determinados de módulo de elasticidade. Com base nos mínimos valores desse módulo de cada classe são estimados os respectivos valores do módulo de ruptura. O valor do MOR é dividido por um fator de segurança, para a obtenção do valor da tensão admissível em flexão estática. Com pequenas diferenças, os princípios para a determinação da tensão admissível em flexão estática são basicamente os mesmos para todos os países (BOSTRÖM, 1994).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ENSAIOS PRELIMINARES

Com a intenção de selecionar os possíveis materiais de estudo foram realizados alguns testes preliminares. Nessa fase inicial, foi testado um maior número de materiais genéticos em menor quantidade. Os testes preliminares serviram para determinar o comportamento desses materiais quando submetidos aos processos de desdobro e secagem, bem como, para determinar a massa específica, os índices de retratibilidade, de inchamento e contração, e a densidade básica ao longo do tronco da árvore.

3.1.1. Coleta e Preparo do Material

Os materiais genéticos foram coletados de plantios comerciais existentes nos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, nos municípios de Mogi Guaçu e Três Lagoas, respectivamente. Foram selecionados cinco clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, dois clones de *E. grandis* e um clone de *E. saligna*, dos quais três do Mato Grosso do Sul e cinco de São Paulo, totalizando oito materiais genéticos.

Para cada clone foi coletada uma árvore representativa do povoamento. A primeira tora da árvore, com dois metros de comprimento, foi utilizada para a realização dos testes de desdobro e secagem. Ao longo do tronco foram retirados discos para a análise de densidade básica. A idade das árvores coletadas variou entre 8,5 e 10 anos, a altura total entre 25 e 35 metros e o DAP entre 15 e 22 centímetros.

Logo após o abate, o material coletado foi acondicionado em sacos plásticos, para não perder umidade, e transportado para Curitiba. Os ensaios e observações foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Curso de Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná.

3.1.2. Desdobro e Secagem do Material Coletado

O desdobro das toras foi realizado na Serraria do Departamento de Tecnologia Rural, localizada na Fazenda Experimental do Canguiri. Durante o processo de desdobro das toras foi observada a tendência de cada material em apresentar rachaduras e defeitos, como empenamentos, encanoamentos e outros. Para as tábuas, de dois metros de comprimento e largura variável de todos os materiais, foi realizada uma avaliação visual dos defeitos decorrentes do desdobro e da qualidade de cada tábua obtida.

A secagem das tábuas desdobradas foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira. O programa de secagem testado iniciou com baixas temperaturas, que não ultrapassaram 45°C, até o ponto de saturação das fibras, 30% de umidade. A temperatura máxima no final do programa de secagem foi de 80°C, quando a madeira atingiu uma umidade em torno de 10%.

Após a secagem, também foi realizada uma avaliação e quantificação visual dos defeitos decorrentes da secagem e da qualidade final das tábuas. As informações de desdobro e secagem, conjuntamente com as análises físicas, auxiliaram na seleção dos materiais genéticos para a continuidade do estudo.

3.1.3. Análises Físicas do Material Coletado

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Paraná. Nessa etapa foi determinada a massa específica aparente a 12%, massa específica básica, anisotropia de contração, anisotropia de inchamento, coeficiente de retratibilidade, variação da massa específica ao longo do comprimento da árvore.

Todas as informações coletadas nessa etapa foram fundamentais para auxiliar na seleção dos materiais genéticos, que deram continuidade ao estudo.

3.1.4. Seleção do Material Genético

A partir dos resultados dos ensaios preliminares foram escolhidos dois materiais genéticos, que apresentaram os melhores índices de anisotropia e retratibilidade, o melhor comportamento no desdobro e na secagem, que foram utilizados nos ensaios complementares.

Baseado nas informações obtidas nessa etapa preliminar, foi possível aprimorar o processamento das toras, reduzindo a quantidade de defeitos decorrente dele, obtendo maior rendimento.

3.2. ENSAIOS COMPLEMENTARES

- Coleta e Preparo do Material

Para a continuidade desse trabalho, foram utilizados dois clones híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis*, **A** e **B**, de procedência do Estado de São Paulo, do Município de Mogi Guaçu, dos plantios comerciais da Champion Papel e Celulose Ltda. Esses plantios comerciais estavam localizados no Horto Areia Branca, apresentando DAP médio entre 17 e 18 cm, altura comercial média de 25 m, altura total média de 30 m e idade de nove anos. Foi estipulado um diâmetro mínimo na ponta fina das toras de 15 cm e um comprimento padrão de 2,55m; para, dessa forma, obter a largura necessária das tábuas que comporiam a viga laminada colada.

Do material genético **A** foram coletados 22,43 m³ de toras e do material genético **B** 20,50 m³. Para o corte das árvores foi utilizado uma motosserra, para as tarefas de retirada e acondicionamento das toras no caminhão foi utilizado um mini-skidder. Essa etapa foi executada em dois dias.

As toras foram desdobradas em uma serraria local especializada no desdobro da madeira de *Pinus* spp. Para essa operação foram utilizadas uma serra-fita simples, uma serra-fita múltipla e uma serra circular simples.

Pelos variados diâmetros das toras foi possível conseguir três larguras de tábuas, de 11 a 13 cm, com espessura de 3,00 cm e comprimento de 2,55m. O lote foi composto por 1.600 tábuas, totalizando um volume serrado de 15 m³.

A qualidade da madeira serrada superou as expectativas formadas a partir dos testes preliminares. As tábuas apresentavam pequenas rachaduras de topo que não se estenderam pelo comprimento das tábuas, não apresentaram encanoamentos ou empenamentos.

As tábuas serradas foram transportadas até Curitiba para serem secas em pré-secadores da empresa Marinepar Pisos Ltda. A secagem iniciou com uma temperatura de 35°C, atingindo uma temperatura máxima de 60°C. A umidade da madeira no início da secagem era de 82%, caindo para 10% no final da secagem.

A secagem lenta, a baixas temperaturas e ventilação forçada, recomendada para a madeira de eucalipto, objetivou a obtenção de peças dimensionalmente estáveis, redução do aparecimento de possíveis defeitos e aproveitamento máximo do lote de estudo.

A operação de secagem foi uma das mais demoradas, estendendo-se por dois meses. As pequenas rachaduras existentes nas tábuas não aumentaram após a secagem, não foram verificados empenamentos, encanoamentos e/ou colapso nas peças de madeira, o que conferiu ao lote maior qualidade.

Após a secagem, as tábuas foram aplainadas para regularização das superfícies e redimensionadas para a largura de 10 cm. O lote passou a ter uma dimensão uniforme, com 2,55 m de comprimento, 10 cm de largura e 2,5 cm de espessura e uma umidade final, de equilíbrio, de 12%.

O teor de umidade recomendado para madeira, que produzirá as peças laminadas coladas, é de 8 a 10% para uso interno e de 12 a 15% para uso externo. A homogeneidade da umidade nas tábuas de uma peça laminada reduz as tensões criadas por diferenças de umidade, que são capazes de prejudicar sua resistência (FREAS & SELBO, 1954).

Após a conclusão dessa etapa, todo o lote foi transportado e armazenado no Laboratório de Tecnologia Madeira, do Curso de Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná, onde os estudos tiveram continuidade.

3.3. CLASSIFICAÇÃO INICIAL DO MATERIAL

Todas as tábuas foram pesadas para a determinação da densidade e posterior separação em classes. Para os materiais genéticos, foram estipuladas quatro classes de densidade, que são:

1. Classe de Densidade 1: 0,50 a 0,60 g/cm³;
2. Classe de Densidade 2: 0,61 a 0,65 g/cm³;
3. Classe de Densidade 3: 0,66 a 0,70 g/cm³;
4. Classe de Densidade 4: 0,71 a 0,80 g/cm³.

A densidade está diretamente relacionada à resistência da peça; essa prévia classificação de resistência foi necessária para uma futura homogeneização das vigas laminadas coladas.

As tábuas apresentavam nós pequenos e vivos em pequena quantidade; essa condição não reduziu a resistência das peças. Por essa razão, o procedimento de substituição dos nós por madeira, conhecido por "patching", não foi necessário.

3.4. ENSAIO DO MATERIAL GENÉTICO

Os ensaios realizados, no Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Paraná, para as tábuas foram: densidade média e flexão estática, de duas maneiras, destrutivamente e não-destrutivamente. As amostras foram coletadas de forma que representassem toda a variação do lote de madeira.

3.4.1. Ensaio de Flexão Estática Destrutivo

Os ensaios de flexão estática destrutivo seguiram as especificações da norma americana ASTM D 143-67. Foram selecionadas cinco tábuas por classe de densidade, por material genético, totalizando 40 tábuas.

De cada uma dessas tábuas, foram confeccionados seis corpos de prova com dimensões nominais de 20 x 20 x 300 mm, de acordo com as especificações da norma ASTM D 143-67. Portanto, para cada classe de densidade foram testados 30 corpos de prova livres de defeito, num total de 240.

Para a realização desses ensaios foi utilizada a Máquina de Ensaio Universal, EMIC. O software que auxiliou na realização do teste forneceu a carga máxima, em kgf, o Módulo de Ruptura, kgf/cm², o Módulo de Elasticidade, em kgf/cm², deformação máxima, em mm, sofrida pelo corpo de prova na carga máxima e o gráfico tensão x deformação para cada um dos corpos de prova.

Para o cálculo do Módulo de Elasticidade foi utilizada a expressão:

$$MOE = C_{LP} * L^3 / (4 * DEF_{LP} * b * h^3), \quad (3.01)$$

onde,

MOE = Módulo de Elasticidade (Kgf/cm²);

C_{LP} = Carga no Limite Proporcional (Kgf);

L = Comprimento do Vão (cm);

DEF_{LP} = Deformação do Corpo no Limite Proporcional (cm);

b = Largura do Corpo de Prova (cm);

h = Altura do Corpo de Prova (cm).

Para o cálculo do Módulo de Ruptura a expressão utilizada foi:

$$MOR = (3 * C_{MÁX} * L) / (2 * b * h^2) \quad (3.02)$$

onde,

MOR =: Módulo de Ruptura (Kgf/cm^2);

$C_{\text{MÁX}}$ = Carga Máxima Aplicada (Kgf);

L = Comprimento do Vão (cm);

b = Largura do Corpo de Prova (cm);

h = Altura do Corpo de Prova (cm).

A Figura 01 mostra a máquina de ensaio para flexão estática dos corpos de prova utilizada nessa etapa do trabalho.

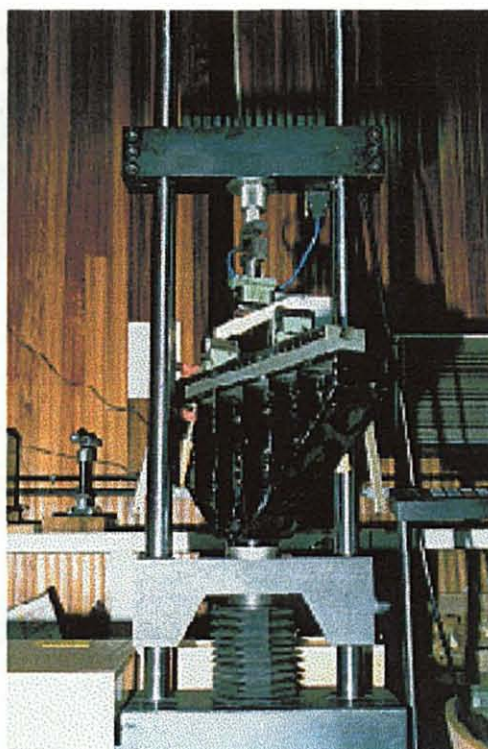


Figura 01. MÁQUINA DE ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA DESTRUTIVO PARA CORPOS DE PROVA.

O principal objetivo desse teste destrutivo foi determinar a amplitude do Módulo de Elasticidade para cada material genético por classe de densidade, para a realização do teste de flexão estática não-destrutivo.

3.4.2. Ensaio de Flexão Estática Não Destrutivo

O ensaio de flexão estática não-destrutivo foi realizado através de uma máquina pneumática de classificação mecânica com carga controlada manualmente, denominada de Stress-Grading: MK III - TIMBER GRADER, Polak Engineer, África do Sul. O teste de flexão estática não destrutivo consistiu em aplicar uma carga constante, dentro do limite proporcional, na maior face da tábua, posicionada nos cilindros inferiores, que atuam simplesmente como apoios. Todas as tábuas, separadas por classe de densidade, e as emendas foram testadas não-destrutivamente. Para cada classe de densidade foi estipulado uma carga de teste, determinada pelo teste destrutivo dos corpos de prova.

O equipamento utilizado para esse ensaio é destinado à classificação de madeiras com espessura maior do que cinco centímetros. Para a classificação de tábuas de pequena espessura, foi verificada uma grande influência nos valores de deformação quando a tábua era presa pelos dispositivos de fixação mecânica do equipamento. Portanto, para o ensaio das peças de pequena espessura, foi estabelecido que a determinação da flecha deveria ser realizada pela simples simulação do teste de flexão estática, sem a utilização dos dispositivos de fixação da peça. (MATSUNAGA, 1995).

Na Figura 02 é mostrado um detalhe da máquina Stress-Grading no momento de realização do ensaio não-destrutivo.

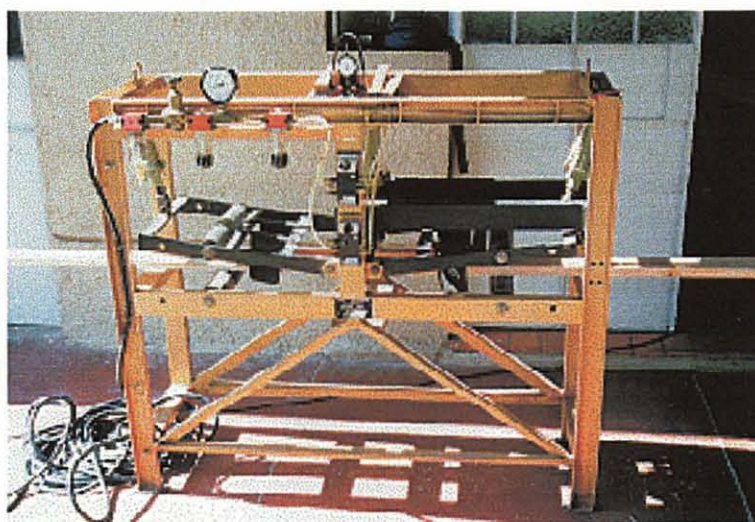


Figura 02. MÁQUINA DE ENSAIO PARA TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA NÃO-DESTRUTIVO PARA TÁBUAS E TÁBUAS EMENDADAS.

Através das deformações medidas, da carga aplicada e das dimensões das peças, para cada tábua e emenda, foi determinado o módulo de elasticidade, que expressa numericamente sua rigidez, com dois pontos de apoio e um ponto de aplicação de carga, medido na face maior da tábua no seu ponto médio central. Para esse cálculo foi utilizada a fórmula de resistência dos materiais, indicada por ROSS e PELERIN (1994):

$$MOE = C_{LP} * L^3 / 48 * DEF_{LP} * I$$

$$I = b * h^3 / 12$$

$$MOE = C_{LP} * L^3 / 4 * DEF_{LP} * b * h^3 \quad (3.03)$$

onde,

MOE = Módulo de Elasticidade (Kgf/cm²);

C_{LP} = Carga no Limite Proporcional (Kgf);

L = Comprimento do Vão (cm);

DEF_{LP} = Deformação do Corpo no Limite Proporcional (cm);

b = Largura do Corpo de Prova (cm);

h = Altura do Corpo de Prova (cm).

I = Momento de Inércia da Seção da Tábua (cm⁴).

3.5. CONFECÇÃO DAS EMENDAS

Para alcançar o comprimento total da viga, quatro metros, foi necessário emendar as peças de madeira. Foram preparadas 400 tábuas por material genético das classes de densidade 2 (0,61-0,65 g/cm³) e 3 (0,66-0,70 g/cm³), com dimensões nominais de 10 cm x 2,54 cm x 2,55 m.

As emendas, e todas as operações de montagem das vigas, foram confeccionadas na empresa EMADEL Engenharia e Obras Ltda., com sede no Município de Araucária, região metropolitana da cidade de Curitiba.

As emendas confeccionadas foram do tipo encaixes dentados horizontais, seguindo as orientações de pressão de colagem citadas na revisão de literatura. Para a colagem das emendas, foi utilizado o mesmo adesivo utilizado para a colagem da viga. O detalhe do tipo de encaixe confeccionado nas tábuas de madeira é ilustrado pela Figura 03.

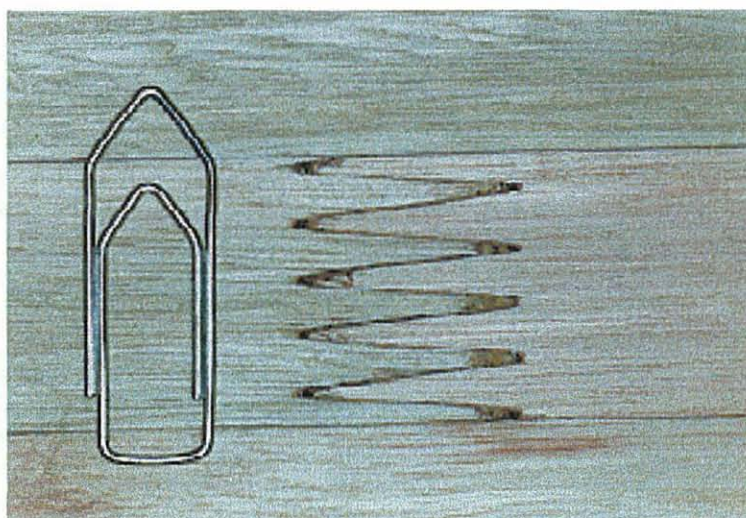


Figura 03. ENCAIXE LONGITUDINAL TIPO “FINGER JOINT” NAS PEÇAS DE MADEIRA

Para padronizar a montagem das vigas, foi estipulado o posicionamento das lâminas, mostrado no Anexo 6.1., respeitando a separação mínima entre emendas. FREAS & SELBO (1954) recomendam uma separação entre emendas de 24 vezes a espessura da lâmina nas seções onde os esforços são próximos aos admissíveis, podendo variar a separação em função dos esforços atuantes.

Dessa forma, foram confeccionados dois tipos de lâminas, ilustrados no Anexo 6.2., com no mínimo uma emenda e no máximo duas emendas por lâmina. As emendas também foram testadas não-destrutivamente nos pontos **A**, **B** e **C** identificados nesse mesmo anexo.

Após o período de cura do adesivo das emendas, as lâminas passaram novamente na plaina para preparar sua superfície para a colagem final, remover o excesso do adesivo e as irregularidades das emendas. Com essa operação ocorreu um redimensionamento das peças que passaram a ter 10 cm de largura, 2,3 cm de espessura e 4,0 m de comprimento. Uma superfície lisa e livre de resíduos é fundamental para o sucesso da colagem.

3.6. ADESIVO

O adesivo utilizado para a confecção das vigas laminadas coladas e das emendas das tábuas foi escolhido em função da resistência à esforços, facilidade de cura à temperatura ambiente e pela recomendação de sua aplicação por outros estudos anteriormente realizados.

Foi escolhido o adesivo à base de resina resorcinol, conhecido comercialmente por **Cascophen RS-216-M**, fabricado pela ALBA QUÍMICA Indústria e Comércio Ltda. É uma resina sintética, à base de resorcinol-formol, em solução álcool/água, recomendada para colagens resistentes à água fria ou fervente, a muitos solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco ou úmido e a outras intempéries. Para formar o adesivo, essa resina é misturada ao endurecedor FM-60-M que tem uma vida útil de aproximadamente quatro horas, a uma temperatura de 20°C. A Tabela 02 contém algumas características do adesivo escolhido.

Tabela 02. ESPECIFICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS DO ADESIVO

Especificações	Quantidades
Viscosidade Brookfield (cP, 25°C)	500 - 800
Teor de Sólidos (%)	53 - 55
Reatividade (21°C - Horas)	4 - 6
pH (25°C)	6,9 - 7,5

* Fonte: Boletim Técnico da Alba Química Indústria e Comércio Ltda. (1998).

Essa resina requer um tempo mínimo de montagem, que compreende o tempo entre o espalhamento da cola na superfície até a aplicação da pressão. Após a retirada das peças da prensa, as colagens atingiram o máximo de resistência após 8 a 10 dias, mantidas em repouso à temperatura ambiente, acima de 20°C. As Tabelas, a seguir, ilustram essas exigências.

Tabela 03. TEMPO MÁXIMO DE MONTAGEM (MINUTOS)

Tipo de Montagem	Temperatura Ambiente			
	20°C	26°C	32°C	38°C
Montagem Aberta (Superfícies Expostas)	15'	10'	7'	5'
Montagem Fechada (Superfícies Juntas)	60'	40'	25'	15'

* Fonte: Boletim Técnico da Alba Química Indústria e Comércio Ltda. (1998).

Tabela 04. TEMPO MÍNIMO DE PRENSAGEM (HORAS)

Tempo de Prensagem	Temperatura Ambiente			
	20°C	24°C	28°C	32°C
Horas	10 - 14	8 - 10	6 - 8	5 - 6

* Fonte: Boletim Técnico da Alba Química Indústria e Comércio Ltda. (1998).

Para cada viga foram aplicados 1600 gramas de adesivo, na proporção de 5 partes de resina para 1 parte de endurecedor. A cola foi preparada em pequenas porções, respeitando o tempo máximo de montagem das vigas. Foi pesada uma quantidade entre 4.200 a 4.500 gramas de resina para 600 a 700 gramas de endurecedor, totalizando 4.800 a 5.200 gramas de adesivo, com rendimento de 5 vigas por preparado. O adesivo foi aplicado nas duas faces das tábuas, previamente limpas sem qualquer resíduo, através de pincéis.

3.7. CLASSES DE VIGAS LAMINADAS COLADAS

As tábuas foram, previamente, classificadas por densidade. Essa classificação foi confirmada através do ensaio de flexão estática não-destrutivo. Foi dada preferência à duas classes de densidade que apresentaram maior número de tábuas. Foram elas: a classe **2**, com densidade variando de 0,61 a 0,65 g/cm³, e a classe **3**, com densidade entre 0,66 e 0,70 g/cm³.

Para cada material genético foram confeccionadas 18 vigas laminadas coladas; sendo 9 vigas formadas pelas tábuas da classe de densidade **2** e 9 vigas formadas pela classe de densidade **3**. Pretendendo, portanto, homogeneizar cada viga confeccionada, que era composta por 10 lâminas, alcançando uma dimensão final de 10 cm de largura, 23 cm de altura e 4 m de comprimento.

3.8. CONFECÇÃO DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS

As operações de preparo das superfícies das tábuas, montagem e prensagem das vigas foram realizadas na empresa EMADEL Engenharia e Obras Ltda.

A superfície das lâminas e os pontos das emendas foram preparados para receber a cola; o adesivo foi aplicado nas duas faces das lâminas com o auxílio de pincéis. Tomou-se muito cuidado para não misturar as lâminas dos diferentes materiais genéticos e das diferentes classes de densidade. Logo em seguida, as lâminas foram levadas à prensa, observando o tempo de montagem aberta recomendado pelo fabricante de adesivos.

O sistema de prensagem utilizado permitiu a prensagem simultânea de seis vigas. A montagem das vigas variou em função da temperatura ambiente e da hora do dia, até no máximo uma hora. A pressão foi aplicada nas vigas, por um torquímetro de catraca previamente calibrado, iniciando na parte central da prensa em direção às extremidades. Após a acomodação das lâminas na prensa, a pressão nos parafusos foi checada, e quando necessário realizou-se um reaperto, mantendo a pressão necessária.

As vigas foram mantidas sob pressão durante um período de 24 horas, necessário para a cura inicial do adesivo. Retiradas da prensa as vigas permaneceram em acondicionamento por mais dez dias no galpão da empresa. No final do período de acondicionamento, as vigas foram aplainadas para regularizar as superfícies e remover o excesso de adesivo na laterais, ficando prontas para os ensaios destrutivos. Nas Figuras 04 e 05, detalhes dessa etapa são ilustrados.



Figura 04. PRENSA DE MADEIRA



Figura 05. VIGAS LAMINADAS COLADAS

3.9. ENSAIO DESTRUTIVO DAS VIGAS

Os ensaios destrutivos foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, da Universidade Federal do Paraná, na máquina universal de ensaios, Tinius Olsen, com suportes especiais, instrumentação e software específico para ensaiar vigas de quatro metros de comprimento.

Esse ensaio seguiu as recomendações da norma americana ASTM D 198-67, Static Tests of Timbers in Structural Sizes, da American Society for Testing and Materials.

As vigas laminadas, de seção retangular de 10 x 23 cm, foram ensaiadas em flexão estática, com a viga posicionada simetricamente sobre dois apoios, com 381 cm de vão e 95 cm de distância entre os dois pontos de aplicação da carga. O carregamento foi contínuo e ininterrupto, com uma velocidade de 3,0 mm/min., com um tempo médio de ensaio de 12 minutos entre o início de aplicação da carga até a ruptura da viga.

Todo o ensaio e os registros de carga e deformação foram automatizados, as leituras dos dados foram realizadas automaticamente em intervalos constantes de tempo.

A carga aplicada durante o ensaio foi medida por uma célula de carga previamente calibrada. As deformações foram medidas por um deflectômetro conectado à máquina de ensaios e registradas diretamente por computador acoplado à máquina de ensaio. Em cada ensaio, foram realizadas, em média, 250 leituras carga x deformação. Após a ruptura, foi determinado o teor de umidade das vigas.

As Figuras mostradas, a seguir, detalham esse ensaio destrutivo das vigas. A Figura 06 mostra detalhes da máquina de ensaio universal, localizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Paraná. A Figura 07 ilustra o ensaio de flexão estática destrutivo das vigas. Na Figura 08 detalha-se o posicionamento do deflectômetro da máquina de ensaio universal, responsável pela medição das deformações ocorridas durante o ensaio de flexão.

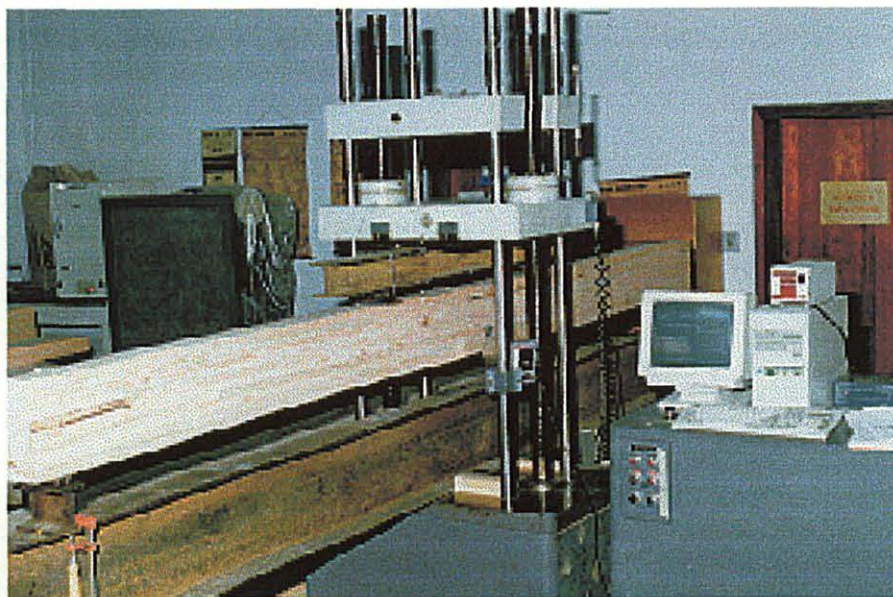


Figura 06. MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL

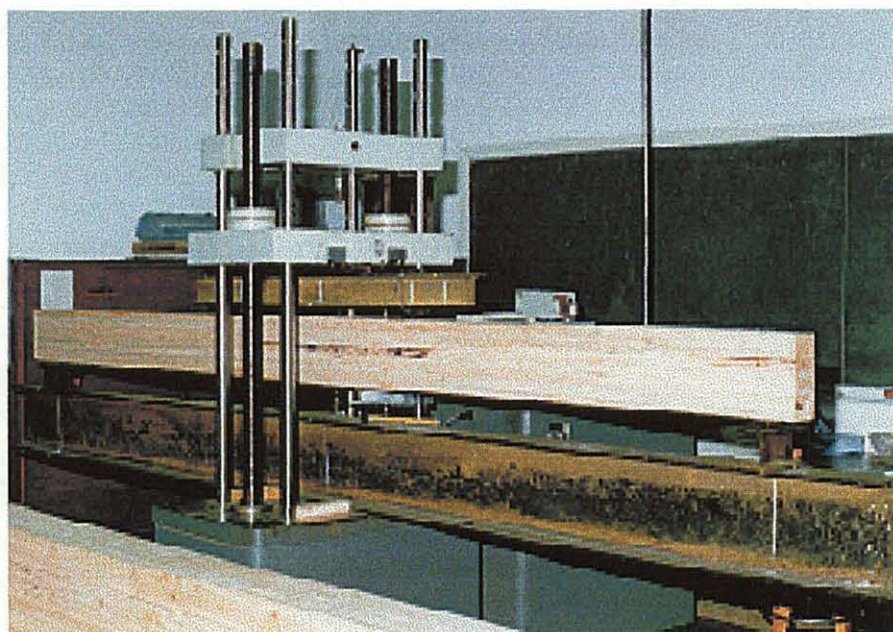


Figura 07. TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA DAS VIGAS

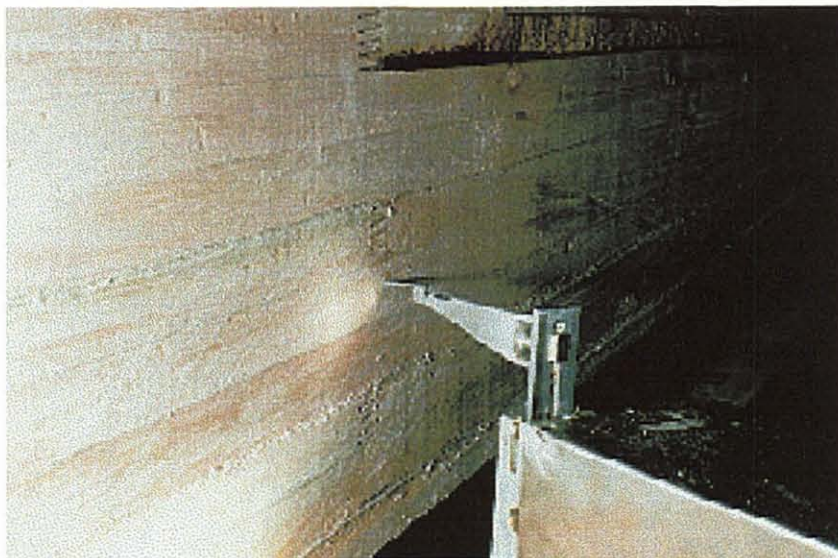


Figura 8. DETALHE DO DEFLECTÔMETRO

3.10. ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Através dos dados dos ensaios e das fórmulas recomendadas pela norma adotada, foram obtidos os valores do módulo de elasticidade e módulo de ruptura para as vigas individuais e um valor médio por tratamento. Com esses resultados foi possível estabelecer uma correlação entre os valores do módulo de elasticidade das vigas e das tábuas.

Foi realizada uma análise estatística para confirmar a distribuição de frequência normal para os dados das tábuas, o que possibilitou testar modelos de regressão linear correlacionando os valores das tábuas e os valores das emendas com os valores das vigas.

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS GENÉTICOS BASEADA NOS ENSAIOS PRELIMINARES

Baseado nos resultados das avaliações preliminares foram selecionados dois materiais genéticos para a continuidade do trabalho. Foram escolhidos os materiais que apresentaram os melhores índices de anisotropia e retratibilidade, o melhor comportamento no desdobro e na secagem.

Durante o processo de desdobro das toras foi observada a tendência de cada material em apresentar rachaduras e defeitos, como empenamentos, encanoamentos e outros. A maioria das rachaduras ocorreram nas tábuas centrais da tora durante o desdobro e logo após sua execução.

Foi possível verificar que as toras conservaram sua umidade até o momento do desdobro, realizado duas semanas após o abate das árvores. Os clones do Estado do Mato Grosso do Sul apresentaram rachaduras menos extensas e em menor número. Durante o desdobro não foi verificado o aparecimento de outros defeitos como encanoamento e/ou empenamentos.

Os defeitos resultantes do processo de secagem foram colapso de pequeno a médio graus, variando com o material genético, empenamentos, encanoamentos e torcimento mais acentuados na extremidade que apresentava menor rachadura. Após a secagem, a maioria das rachaduras não apresentou alteração, em relação às condições registradas após o desdobro.

Os índices das análises físicas realizadas comprovaram algumas observações sobre o comportamento da madeira durante a secagem. A massa específica a 12% de umidade variou de 0,65 g/cm³ a 0,82 g/cm³, e está diretamente relacionada a resistência mecânica, contração, trabalhabilidade e permeabilidade (Anexo 7). Quanto maior a massa específica, maior a resistência mecânica, maior a contração da madeira e menor a estabilidade dimensional (TSOUMIS, 1991).

Os índices de anisotropia de contração variaram de 1,1 a 2,0 , indicando baixa a média dificuldade de secagem. Para calcular as dimensões finais das peças a serem desdobradas utiliza-se o coeficiente de retratibilidade, que expressa a quantidade de retração que a madeira irá sofrer a cada decréscimo de 1% de umidade.

Os índices de contração e inchamento não devem ser utilizados por representarem as contrações e inchamentos máximos das peças de madeira. Anisotropia de contração entre 1,2 e 1,5 indica madeiras de bom comportamento no processamento, utilizadas quando empenamentos e torções não são permitidos. Madeiras normais apresentam anisotropia de contração entre 1,6 a 1,9; madeiras com restrições para alguns usos apresentam anisotropia de contração acima de 2,0 (KOLLMANN, 1959).

Nas Tabelas, a seguir, são apresentados os valores de massa específica, anisotropia e retratibilidade dos materiais avaliados.

Tabela 05. VALORES DE MASSA ESPECÍFICA MÉDIA (g/cm³) DE OITO MATERIAIS GENÉTICOS.

Material Genético	ME verde	ME 12%	ME 0%
1 (H - SP)	0,97	0,65	0,61
2 (G - SP)	1,00	0,80	0,75
3 (G - SP)	1,01	0,74	0,69
4 (H - SP)	0,96	0,68	0,64
5 (H - SP)	0,96	0,74	0,66
6 (H - MS)	0,99	0,72	0,67
7 (S - MS)	0,98	0,70	0,63
8 (H - MS)	1,05	0,82	0,77
Média Geral	0,99	0,73	0,68

* H: híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*; G: *E. grandis*; S: *E. saligna*.

* SP: São Paulo; MS: Mato Grosso do Sul.

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

Tabela 06. VALORES DE ANISOTROPIA DE CONTRAÇÃO, ANISOTROPIA DE INCHAMENTO E COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE.

Material Genético	Anisotropia		Retratibilidade			Contração	Inchamento
	Contração	Inchamento	Radial	Tangencial	Longitudinal	Vol. (%)	Vol. (%)
1 (H)	1,4	1,5	0,23	0,24	0,027	15,4	18,2
2 (G)	1,1	1,1	0,27	0,23	0,026	16,1	19,3
3 (H)	1,4	1,4	0,22	0,23	0,022	14,8	17,5
4 (H)	1,5	1,6	0,23	0,25	0,016	16,5	19,9
5 (H)	1,7	1,8	0,24	0,30	0,019	19,3	23,9
6 (H)	1,9	2,0	0,17	0,25	0,020	17,4	21,0
7 (S)	2,0	2,2	0,15	0,23	0,019	15,2	17,9
8 (H)	1,5	1,6	0,22	0,24	0,013	17,1	20,7
Média	1,6	1,6	0,22	0,25	0,020	16,5	19,8

* H: híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*; G: *E. grandis*; S: *E. saligna*.

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

Através das informações obtidas nos ensaios preliminares, foi possível aprimorar o processamento das toras, através da utilização de equipamentos mais adequados para esse processo, reduzindo a quantidade de defeitos decorrente dele, obtendo maior rendimento.

4.2. CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO MATERIAL GENÉTICO ESTUDADO

Foram determinadas algumas características do material genético utilizado na confecção das vigas laminadas coladas. Entre elas, a massa específica, anisotropia de contração e inchamento, e coeficiente de retratibilidade.

A Tabela, a seguir, mostra a massa específica média dos materiais genéticos selecionados para a confecção das vigas laminadas coladas. Para o material genético **A**, com idade de 8,5 anos, a massa específica básica encontrada foi de 0,61 g/cm³. O material genético **B** apresentou uma massa específica básica de 0,64 g/cm³, com 9 anos de idade.

Tabela 07. VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA (g/cm^3) POR MATERIAL GENÉTICO.

Material Genético	M.E. Verde	M.E. 12%	M.E. Básica	Idade (anos)
A	0,97	0,65	0,61	8,5
B	0,96	0,68	0,64	9

Na literatura é possível encontrar algumas citações sobre valores da massa específica básica da duas espécies que formam a espécie híbrida estudada. Para a espécie *E. grandis*, com 11 anos de idade, obteve-se valores de massa específica básica de $0,62\text{g/cm}^3$. Para *E. urophylla*, com 6 anos de idade, uma massa específica básica de $0,51\text{ g/cm}^3$ (BRITO & BARRICHELO 1977). Em plantios de *E. urophylla*, com 16 anos, a massa específica básica encontrada foi de $0,56\text{ g/cm}^3$ (BRASIL & FERREIRA, 1972).

A espécie híbrida estudada, com nove anos de idade, apresenta uma massa específica básica maior do que as espécies puras mais velhas. Indicando, dessa forma, maior quantidade de material lenhoso num dado volume saturado, o que pode resultar em maior resistência mecânica.

Os valores médios de anisotropia de contração e de inchamento, bem como contração e inchamento volumétricos são apresentados na Tabela 08. Para os dois materiais genéticos foram encontrados valores de anisotropia de contração e inchamento entre 1,4 e 1,6 , indicando baixa a média dificuldade de secagem e bom comportamento no processamento, podendo ser utilizadas quando empenamentos e torções não são permitidos.

O coeficiente de retratibilidade expressa a quantidade de retração que a peça de madeira irá sofrer a cada decréscimo de 1% de umidade, e deve ser utilizado para calcular as dimensões finais das peças a serem desdobradas. Os valores médios do coeficiente de retratibilidade, para os materiais genéticos selecionados, são apresentados na Tabela 09.

Os valores de contração volumétrica e de inchamento volumétrico são superiores aos valores para *E. grandis*, com 19 anos de idade, de plantios comerciais no Estado do Paraná, que apresentaram uma contração volumétrica média de 14,9%. O que indica uma relativa estabilização desse valor com o aumento da idade.

Tabela 08. VALORES MÉDIOS DE ANISOTROPIA DE CONTRAÇÃO, ANISOTROPIA DE INCHAMENTO, CONTRAÇÃO E INCHAMENTO VOLUMÉTRICOS DOS MATERIAIS GENÉTICOS SELECIONADOS.

Material Genético	Anisotropia		Contração	Inchamento
	Contração	Inchamento	Volumétrica (%)	Volumétrica (%)
A	1,4	1,5	15,4	18,2
B	1,5	1,6	16,5	19,9

Tabela 09. VALORES MÉDIOS DO COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE DOS MATERIAIS GENÉTICOS SELECIONADOS.

Material Genético	Coeficiente de Retratabilidade (%)		
	Radial	Tangencial	Longitudinal
A	0,23	0,24	0,027
B	0,23	0,25	0,016

- Determinação das Classes de Densidade

Baseado nos resultados da distribuição de frequência, foram estabelecidas quatro classes de densidade para as tábuas produzidas dos dois materiais genéticos. Essa separação teve por objetivo agrupar as peças de madeira com resistência semelhante. As classes de densidade com maior frequência foram as classes centrais 2 (0,61–0,65 g/cm³) e 3 (0,66-0,70 g/cm³). Esse resultado é confirmado pelos valores médios de massa específica aparente a 12%.

A Tabela 10 mostra a distribuição de frequência das classes de densidade e seus respectivos percentuais, para cada material genético estudado.

Tabela 10. FREQUÊNCIA DAS CLASSES DE DENSIDADE DAS TÁBUAS POR MATERIAL GENÉTICO.

Classes de Densidade (g/cm ³)	Material Genético A		Material Genético B	
	(unidades)	(%)	(unidades)	(%)
1. (0,50 - 0,60)	137	13,5	19	3,4
2. (0,61 - 0,65)	421	41,5	200	35,5
3. (0,66 - 0,70)	352	34,7	270	48,0
4. (0,71 - 0,80)	105	10,3	74	13,1
Total	1.015	100	563	100

A soma das frequências dessas duas classes de densidade representam 76,2% e 83,5% do total, respectivamente, para os materiais genéticos **A** e **B**. Essa relativa uniformidade de densidade das tábuas pode ser explicada pela utilização apenas das primeiras toras das árvores abatidas. Os dados da variação de massa específica ao longo da altura da árvore podem ser consultados no Anexo 7.

SOUZA *et al* (1986), para *E. grandis* e *E. saligna*, verificaram um decréscimo significativo da densidade básica no sentido axial. Esse decréscimo ocorreu até a metade da árvore e um aumento crescente da densidade básica a partir desse ponto até o topo. Segundo os autores, essa tendência é observada com frequência no gênero *Eucalyptus*. Para o material estudado foi verificada a tendência de decréscimo da densidade básica ao longo da altura das árvores, esses resultados são apresentados no Anexo 7.

A distribuição normal dos valores de densidade das tábuas de cada material genético é apresentada nas Figuras 09 e 10.

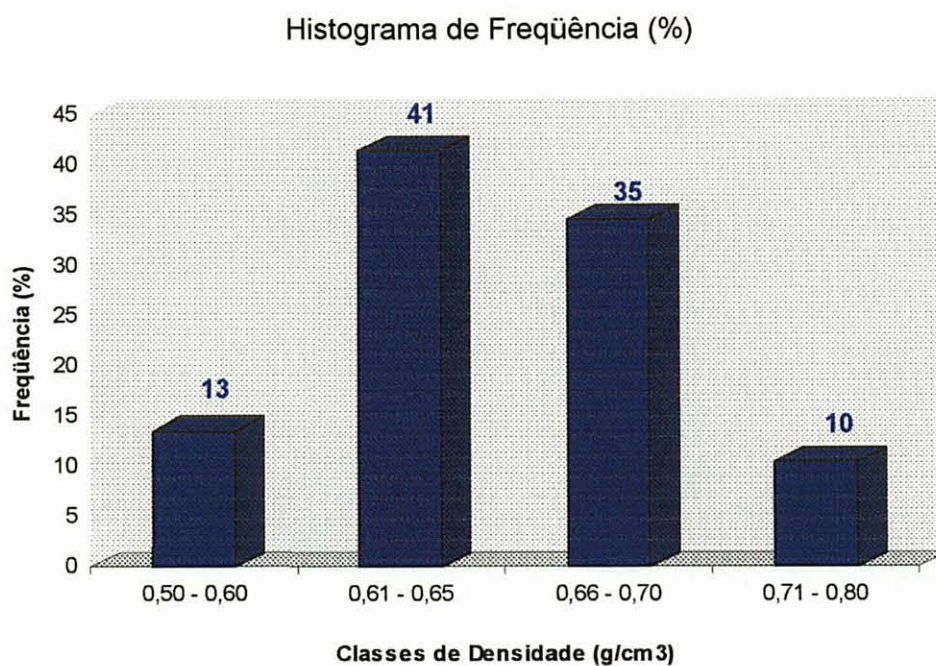


Figura 09. DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DAS TÁBUAS DO MATERIAL GENÉTICO A.

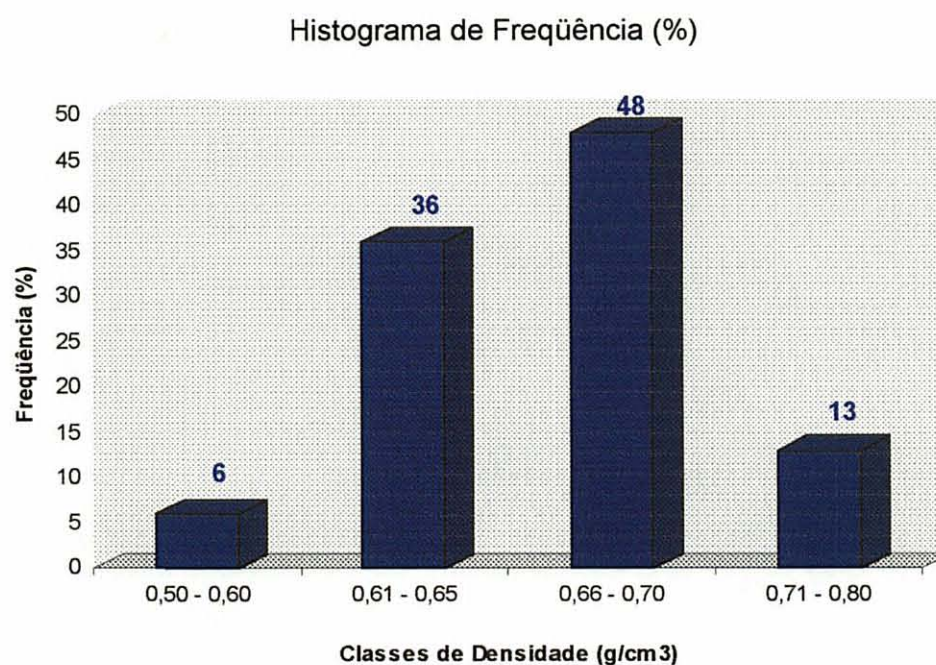


Figura 10. DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DAS TÁBUAS DO MATERIAL GENÉTICO B.

O teste de Tukey foi aplicado para as diferentes classes de densidade, verifica-se uma diferença significativa entre as mesmas, para os dois materiais genéticos, os quais são apresentados no Anexo 2.

A grande variabilidade da madeira pode ser expressa pelas variações da massa específica. As propriedades de resistência da madeira dependem, também, da quantidade de material lenhoso presente. Dessa forma, a separação das tábuas, em classes de densidade, teve por objetivo agrupar peças de madeira com resistência mecânica supostamente semelhante.

4.3. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

4.3.1. Corpos de Prova Livres de Defeito

O teor de umidade médio dos corpos de prova, determinados pelo método de pesagem, após o acondicionamento, foi de 12,1% e 12,5%, para o material genético **B** e **A**, respectivamente. Observando os valores médios por classe de densidade, nas Tabelas 11 e 12, verifica-se uma baixa variabilidade entre eles, indicando ter havido um correto acondicionamento dos corpos de prova e uma homogeneidade do teor de umidade. Essa homogeneidade é fundamental para a comparação dos resultados entre as classes de densidade, uma vez que a umidade exerce direta influência sobre a resistência da madeira.

Nas Tabelas 11 e 12 estão resumidos os valores médios de resistência à flexão estática dos corpos de prova do material genético **A** e **B**, respectivamente.

Observa-se um aumento da resistência com o aumento da densidade dos corpos de prova. Analisando conjuntamente os resultados dos parâmetros avaliados é possível confirmar alguns conceitos de resistência. O módulo de elasticidade, por ser um valor teórico, não fornece informações reais sobre o comportamento do material. Mas através dele, é possível afirmar que quanto maior o seu valor maior será a resistência do material. Quanto menor seu valor piores serão as qualidades do material para fins estruturais (TANAAMI, 1986).

Os parâmetros carga máxima, módulo de elasticidade e módulo de ruptura aumentaram com o aumento da densidade. Os valores de deformação na carga máxima apresentaram pequena variação nas diferentes classes de densidade.

Para os materiais **A** e **B**, respectivamente, os valores médios do módulo de elasticidade foram de 151.206 kgf/cm² e 146.189 kgf/cm². Os valores médios do módulo de ruptura foram 963 kgf/cm² e 986 kgf/cm², para os materiais **A** e **B**. Para o parâmetro carga máxima foram encontrados valores médios de 181 kgf e 181,5 kgf, respectivamente para **A** e **B**. Os valores do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura à flexão estática encontrado para *Eucalyptus grandis* com 19 anos, de plantios comerciais localizados no Estado do Paraná, foram de 129.682 kgf/cm² e de 647 kgf/cm², respectivamente. Novamente, o material genético híbrido estudado superou, em resistência mecânica, plantios de espécie pura com idades mais avançadas (BOLETIM TÉCNICO – KLABIN, 1998).

Tabela 11. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DOS CORPOS DE PROVA DO MATERIAL GENÉTICO A POR CLASSE DE DENSIDADE.

Classes de Densidade	Carga Máxima	MOR	MOE	Deform. Carga Máxima	Teor de Umidade
(g/cm ³)	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
1. 0,50 - 0,60	154	818	131.510	6,9	12,5
2. 0,61 - 0,65	170	905	147.396	6,7	12,6
3. 0,66 - 0,70	185	983	154.538	7,1	12,6
4. 0,71 - 0,80	215	1.146	171.380	7,2	12,6
Média	181	963	151.206	7,0	12,6

Tabela 12. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DOS CORPOS DE PROVA DO MATERIAL GENÉTICO B POR CLASSE DE DENSIDADE.

Classes de Densidade	Carga Máxima	MOR	MOE	Deform. Carga Máxima	Teor de Umidade
(g/cm ³)	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
1. 0,50 - 0,60	154	819	120.140	7,3	12,5
2. 0,61 - 0,65	156	833	133.909	6,7	12,3
3. 0,66 - 0,70	188	999	153.693	7,7	12,2
4. 0,71 - 0,80	229	1.222	177.014	8,4	12,0
Média	181,5	986	146.189	7,5	12,3

Na Tabela 13, são apresentados os valores máximos e mínimos de cada parâmetro avaliado no ensaio de flexão estática, dos corpos de prova livres de defeitos.

Tabela 13. VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DO TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA EM CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS.

Esforço	Material Genético A		Material Genético B	
	Mínimo*	Máximo*	Mínimo*	Máximo*
ME (g/cm ³)	0,52	0,78	0,55	0,83
Carga Máxima (kgf)	124,4	264,4	119,3	283,2
MOR (kgf/cm ²)	661,9	1.388	626,4	1.502
MOE (kgf/cm ²)	105.300	201.600	91.230	212.400
Deformação. Máxima (mm)	3,31	11,39	3,35	13,61
Umidade (%)	11,02	15,92	10,54	13,87

* Valores Médios Gerais.

O teste de Tukey aplicado aos parâmetros de densidade, módulo de elasticidade e módulo de ruptura mostraram diferenças significativas entre as classes de densidade, que são apresentadas no Anexo 2. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DAS CLASSES DE DENSIDADE DOS MATERIAIS GENÉTICOS A E B.

Classes de Densidade	Material Genético A			Material Genético B		
	Densidade	MOE	MOR	Densidade	MOE	MOR
4. 0,71 - 0,80	a	a	a	a	a	a
3. 0,66 - 0,70	b	b	b	b	b	b
2. 0,61 - 0,65	c	b	c	c	b c	c
1. 0,50 - 0,60	d	c	d	d	c	c

Analizando o parâmetro módulo de elasticidade (MOE) para os dois materiais genéticos, verifica-se que o mesmo teste não mostrou diferenças significativas entre as classes centrais de densidade, **2** e **3**. Para as classes de densidade **1** e **2**, do material genético **B**, o módulo de ruptura (MOR) não apresentou diferença significativa. As análises de variância, para os parâmetros MOE e MOR, são apresentadas no Anexo 2.

4.3.2. Resistência das Tábuas Testadas por Ensaio Não-Destrutivo

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados do ensaio de flexão estática não-destrutivo obtidos para as tábuas dos materiais genéticos **A** e **B**, respectivamente.

Para as tábuas do material genético **A**, os valores do módulo de elasticidade aumentaram com o aumento da densidade, apresentando diferenças significativas entre classes de densidade. As deformações médias das tábuas no limite proporcional, também, apresentaram diferenças significativas, quando avaliadas pelo teste de Tukey, aumentando com o aumento da densidade.

Para a classe de densidade **1**, do material genético **B**, o valor médio de MOE foi estatisticamente igual ao valor da classe **4**. As menores deformações corresponderam aos maiores valores de MOE, que aumentam com o aumento da densidade. As classes de densidade, **2** e **3**, apresentaram deformações e valores médios de MOE estatisticamente iguais.

Tabela 15. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DAS TÁBUAS AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA NÃO-DESTRUTIVO POR CLASSE DE DENSIDADE E RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA O MATERIAL GENÉTICO A.

Classe de Densidade	Densidade (g/cm ³)	Teste de Tukey	Deformação LP (mm)	Teste de Tukey	MOE (kgf/cm ²)	Teste de Tukey
4. 0,71 - 0,80	0,76	a	0,63	a	168.179	a
3. 0,66 - 0,70	0,71	b	0,62	a	160.701	a b
2. 0,61 - 0,65	0,67	c	0,52	b	153.607	b c
1. 0,50 - 0,60	0,61	d	0,56	b	145.913	c

Tabela 16. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DAS TÁBUAS AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA NÃO-DESTRUTIVO POR CLASSE DE DENSIDADE E RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA O MATERIAL GENÉTICO B.

Classe de Densidade	Densidade (g/cm ³)	Teste de Tukey	Deformação LP (mm)	Teste de Tukey	MOE (kgf/cm ²)	Teste de Tukey
4. 0,71 - 0,80	0,75	a	0,55	b	184.344	a
3. 0,66 - 0,70	0,71	b	0,59	a b	155.175	b c
2. 0,61 - 0,65	0,67	c	0,62	a	135.652	c
1. 0,50 - 0,60	0,62	d	0,57	a b	174.472	a b

4.3.3. Teste de Resistência das Emendas

As lâminas foram confeccionadas, por tábuas das classes **2** (0,61 - 0,65g/cm³) e **3** (0,66 - 0,70 g/cm³), dos dois materiais genéticos. Os valores médios de resistência das emendas são ilustrados pela Tabela 17.

Tabela 17. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DAS EMENDAS DAS LÂMINAS AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA NÃO-DESTRUTIVO PARA OS DOIS MATERIAIS GENÉTICOS.

Classe de Densidade	Material Genético A				Material Genético B			
	MOE (kgf/cm ²)	Teste Tukey	Deform. LP (mm)	Teste Tukey	MOE (kgf/cm ²)	Teste Tukey	Deform. LP (mm)	Teste Tukey
2. 0,61 - 0,65	150.015	a	0,58	a	100.345	a	0,69	a
3. 0,66 - 0,70	114.944	b	0,60	b	129.546	b	0,54	b

A classe de densidade **2**, do material genético **A**, apresentou o maior valor de MOE e, correspondentemente, a menor deformação, diferente estatisticamente da classe **3**. Apresentando, dessa forma, um comportamento diferenciado das tábuas, onde essas duas classes de densidade não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Para o material genético **B**, verificou-se um comportamento inverso ao observado para o material genético **A**. A classe de densidade **3** apresentou o maior valor de MOE e a menor deformação. Verificou-se, também, para esse material, uma diferença estatisticamente significativa entre as classes de densidade, bem como, uma diferenciação da resistência das emendas e das tábuas.

Comparando os valores médios de resistência das tábuas e tábuas emendadas, pode-se observar uma redução da resistência de 20%, em média, para os dois materiais estudados. A deformação média das emendas, da classe **2** para os dois materiais genéticos, aumentou em relação a deformação média das tábuas. Para a classe de densidade **3**, a deformação média das tábuas foi maior do que a deformação média das emendas.

A Figura 11 compara os módulo de elasticidade das tábuas e das tábuas com emendas para as duas classes de densidade dos dois materiais estudados.

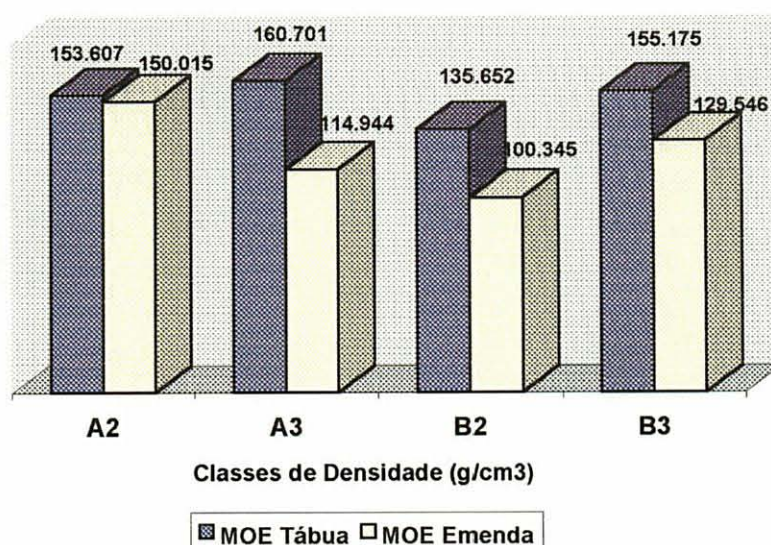


Figura 11. VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS E DAS TÁBUAS COM EMENDAS (Kg/cm²).

4.3.4. Vigas Laminadas Coladas

O teor de umidade das vigas laminadas coladas foi, em média, 12%, não sendo necessário ajustar os valores de resistência para esse teor de umidade. Para os materiais estudados foram calculados os valores médios por classe de densidade dos parâmetros carga máxima, deformação na carga máxima, carga no limite proporcional, deformação no limite proporcional, módulo de elasticidade e módulo de ruptura, e ainda, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Os valores individuais dos parâmetros de cada viga é apresentado no Anexo 1.

As Tabelas 18 e 19 apresentam os valores médios de resistência das vigas laminadas coladas ao ensaio de flexão estática para os materiais genéticos **A** e **B**, respectivamente.

Tabela 18. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA - MATERIAL GENÉTICO A.

Classe de Densidade	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Carga Máx. (Kgf)
2. 0,61 - 0,65	108.845	416,74	3.857
3. 0,66 - 0,70	116.071	362,89	3.359

Para os dois materiais estudados, o módulo de elasticidade, das vigas e das tábuas aumenta com o aumento da densidade. Os valores de MOE e carga máxima não apresentaram diferenças estatisticamente significantes para as duas classes de densidade do material genético A, apresentados na Tabela 18. O coeficiente de variação do MOE foi de 5,1% e 8,1% para as classes de densidade 2 e 3, respectivamente. Para o MOR, o coeficiente de variação foi maior na classe 3 do que para a classe 2, com valores de 14,3% e 9,7%.

Tabela 19. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA - MATERIAL GENÉTICO B.

Classe de Densidade	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Carga Máx. (Kgf)
2. 0,61 - 0,65	101.705	352,26	3.260
3. 0,66 - 0,70	127.303	487,30	4.510

Para as vigas formadas pelo material genético B, nas duas classes de densidade, foram verificadas diferenças significativas para os três parâmetros avaliados. O aumento de resistência seguiu a tendência observada nas tábuas e nas vigas do material genético A. O coeficiente de variação para o MOE foi de 9,4% e 4,3%, respectivamente, para as classes 2 e 3. O valor da carga máxima para as vigas da classe 3 foi o maior encontrado para os dois materiais genéticos.

Comparando as vigas dos dois materiais genéticos e aplicando o teste de Tukey, encontramos os resultados mostrados na Tabela 20. As vigas de melhor resistência foram as formadas pela classe de densidade 3 (0,61 a 0,65 g/cm³) do material **B**, seguidas pelas vigas da classe 3 do material **A**. Confirmando os resultados anteriores, as vigas de maior densidade apresentaram o maior MOE.

Tabela 20. RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS DOS MATERIAIS GENÉTICOS **A** E **B**.

Classes de Vigas	MOE	Carga Máxima
B3	a	a
A3	b	b
A2	b	a b
B2	c	b

Pelos resultados obtidos do teste de Tukey pode-se concluir que as vigas formadas pelo material genético **A** demonstraram maior homogeneidade, mesmo em classes de densidade diferentes. As vigas do material genético **B** apresentaram diferenças significativas entre as classes de densidade.

Os valores de carga máxima e módulo de ruptura são influenciados por fatores inerentes a madeira e fatores externos. Entre os fatores externos estão os encaixes dentados, que influenciam significativamente esses valores quando são a causa da ruptura.

Foram observados três tipos principais de rupturas: por tração, cisalhamento e delaminação. A ruptura mais comum, que ocorreu em todas as vigas, foi por tração na camada externa. Em seguida, observou-se a ruptura por cisalhamento ao longo do eixo longitudinal da viga, até a terceira camada da parte inferior, provavelmente, ocasionada pela presença de redutores de resistência no local. E também verificou-se a ruptura por delaminação da linha de cola, porém, pouco freqüente. Foi observado que quando ocorria a ruptura por tração na camada externa da viga a emenda da primeira lâmina também rompia.

Segundo HELLMEISTER (1987), bom desempenho dos encaixes dentados é, provavelmente, função da boa qualidade de confecção e da distribuição espacial dentro da viga. Quando esses encaixes são comparados aos encaixes de cunha e à madeira maciça são considerados de baixa eficiência e baixa resistência.

No presente estudo, apesar da ruptura de algumas vigas terem iniciado nos encaixes dentados, o valor das cargas máximas mantiveram-se na média das classes.

Outro fator externo correlacionado com o módulo de ruptura é o fator de forma, que depende da relação altura e comprimento da viga (SIMIONI, 1978). Para as vigas ensaiadas esse fator não influenciou o módulo de ruptura, porque todas possuíam as mesmas dimensões e não atingiram as dimensões críticas.

Os fatores inerentes da madeira, como nós, grã, etc. influenciam significativamente no valor do módulo de ruptura das vigas laminadas coladas. Entretanto, uma das vantagens da viga laminada, em relação à uma viga maciça, é a dispersão destes defeitos e sua limitação à espessura das lâminas que constituem a viga. Essa dispersão dos defeitos tem sido considerada como um fator benéfico sob a resistência da viga (WARDLE, 1977 citado por SIMIONI, 1978).

Esses fatores, provavelmente, justificam o comportamento das vigas laminadas coladas e seus valores de carga máxima e módulo de ruptura, obtidos para os materiais genéticos estudados e suas respectivas classes de densidade.

Nas vigas ensaiadas, foi observado que as rupturas ocorreram nos estágios finais da deformação plástica, sem grandes variações na proporção de deflexão, em relação ao limite proporcional, evidenciando assim, o comportamento de um material de alta resistência.

O rendimento obtido na transformação das toras em tábuas foi de 35%. O volume inicial de toras foi de 43 m³, resultando em um volume serrado de 15m³. Durante a secagem não foi verificado perda de material decorrente de defeitos.

Do total serrado e seco, apenas 10 m³ foram utilizados para a confecção das vigas laminadas coladas. Defeitos, como fendas de topo, foram eliminados das tábuas utilizadas para compor as vigas. O rendimento obtido por essa operação de confecção das vigas foi de 40%.

4.3.5. Estudos de Adequabilidade de Modelos de Regressão Linear

Através da análise de regressão foram determinados modelos matemáticos correlacionando os valores do módulo de elasticidade das vigas, determinados pelo ensaio de flexão estática destrutivo, com os valores de densidade e módulo de elasticidade das tábuas, obtidos pelo ensaio não destrutivo.

A partir dos valores do MOE das tábuas utilizadas na confecção das vigas foram determinados modelos de regressão linear, capazes de estimar o valor do MOE das vigas.

Foram obtidas equações específicas por material genético e para os dois materiais conjuntamente. Os modelos de regressão linear são apresentados no Anexo 4.

Os modelos que melhor estimam o módulo de elasticidade (MOE) das vigas em função das características das tábuas, selecionados segundo os critérios mencionados no item 3.10, para os materiais genéticos isolados e combinados entre si, são os seguintes:

1. Para o Material Genético A

$$\text{MOE}_{\text{VIGA}} = 87.508,99 + 41.710,11 * \text{DENSIDADE}_{\text{TÁBUA}}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	68,49	21,34	0,38	455 **
Pr > t	0,0001	0,0001		

2. Para o Material Genético B.

$$MOE_{VIGA} = 29.927 + 155.408 * DENSIDADE_{TÁBUA} - 0,052115 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	5,99	22,66	- 9,91	0,74	635 **
Pr > t	0,0001	0,0001	0,0001		

3. Para o Material Genético A e B.

$$MOE_{VIGA} = -20.325 + 243.122 * DENSIDADE_{TABUA} - 0,1509 * MOE_{TABUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	-1.950	17,33	-4,636	0,54	169**
Pr > t	0,05	0,0001	0,0001		

Procedimentos semelhantes foram utilizados para se obter modelos de regressão linear que estimassem o módulo de elasticidade das emendas das lâminas em função das características das tábuas, obtidas pelo ensaio não destrutivo. Esses resultados são apresentados no Anexo 6.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos valores de resistência obtidos e pelo comportamento das vigas pode-se concluir que a madeira utilizada para sua confecção é de alta qualidade e resistência. Essas qualidades podem ser atribuídas aos cuidados observados durante o processamento das tábuas e ao melhoramento genético a que foram submetidas, principalmente por apresentarem poucos elementos redutores de resistência, como nós, rachaduras e grã reversa. As tábuas apresentaram alta variabilidade de densidade e resistência mecânica, sendo possível estabelecer quatro classes de densidade e esforços.

A metodologia utilizada possibilitou o desenvolvimento de modelos de regressão que estimam a resistência de vigas laminadas coladas em função das características das peças de madeira, determinadas previamente.

Além disso, pode-se concluir também que:

- Os valores de massa específica básica obtidos para os materiais genéticos avaliados foram semelhantes ao de outras espécies utilizadas para fins estruturais;
- Os valores de anisotropia de contração e anisotropia de inchamento confirmam uma dificuldade média de secagem do eucalipto e um bom comportamento no processamento;
- O método adotado para a classificação mecânica da madeira permitiu uma avaliação eficiente das tábuas por resistência, estabelecendo-se quatro classes de resistência. O emprego de outros parâmetros à classe de resistência possibilitou um melhor aproveitamento da madeira e a obtenção de vigas com lâminas de resistência homogêneas;
- Os valores de resistência, MOE e MOR, variaram de acordo com as classes de densidade, evidenciando uma correlação entre a rigidez das tábuas e a rigidez das vigas;
- As tábuas emendadas por ligações do tipo “*finger joint*” apresentaram uma redução da resistência em torno de 20%, quando comparadas com a resistência à flexão das tábuas;

- A prévia classificação das tábuas e a separação em classes de densidade conferiram ao produto final maior homogeneidade e resistência mecânica, além de melhor aproveitamento da matéria-prima;
- A ruptura das vigas ocorreu por tração na lâmina inferior, algumas vezes teve início na emenda dentada. Esse fato pode ser minimizado com o reposicionamento das emendas dentadas nas lâminas formadoras das vigas;
- De uma forma geral, observando os resultados gerais das vigas laminadas coladas, o material genético **B** apresentou maior resistência, do que o material genético **A**, com diferença nas duas classes de densidade avaliadas. Sendo a classe de densidade **3** a mais resistente;
- O material genético **A** apresentou maior homogeneidade de resistência das vigas laminadas coladas, não havendo diferenças significativas entre as classes de densidade estudadas.
- Os modelos de regressão linear, obtidos para estimar o módulo de elasticidade das vigas laminadas coladas em função da classificação mecânica da madeira, apresentaram coeficientes de correlação baixos, com o material genético **B** apresentando um melhor desempenho ;
- A variável independente da equação, que permite estimar o módulo de elasticidade das vigas, é de fácil obtenção, possibilitando estimar previamente a rigidez das vigas a serem produzidas a partir das propriedades de rigidez das peças de madeira disponíveis;
- As vigas laminadas coladas de eucalipto, constituem um elemento estrutural de alta qualidade e resistência mecânica.

As seguintes recomendações podem ser apontadas:

- Representar, através de modelos matemáticos, a influência de outras propriedades de resistência e de rigidez no módulo de elasticidade de elementos de madeira laminada colada;

- Estudar critérios de dimensionamento de elementos de madeira laminada colada, produzidas com madeiras de reflorestamentos;
- Estudar o comportamento de outras espécies, avaliando o produto em situações reais de utilização e carregamento;
- Estudar a viabilidade econômica para a produção comercial de vigas laminadas coladas de eucalipto, criando alternativas às indústrias detentoras dessa matéria-prima.

6. ANEXOS

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS

1.1. Teste de Flexão Estática Destrutivo para as Vigas Laminadas Coladas
(Dimensões: 10 x 23 x 400 cm, formada por 10 tábuas de 23 mm, Umidade das Vigas: 12%).

1.1.1. Material Genético A, Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

Viga (N)	Carga Máx. (Kgf)	Deform. Máx. (mm)	Carga LP (Kgf)	Deform. LP (cm)	MOE (Kgf/cm ²)	MOR (Kgf/cm ²)
A2_2	4.064	47,94	2.000	2,09	108.539	439,05
A2_3	2.981	32,22	2.011	2,10	108.411	322,05
A2_4	4.156	50,76	2.000	2,29	98.990	448,99
A2_5	3.897	43,78	2.011	2,19	104.114	421,01
A2_6	4.139	48,25	2.022	1,96	117.175	447,15
A2_7	3.856	41,75	2.008	2,09	108.817	416,58
A2_8	3.878	44,98	2.006	2,05	110.930	418,96
A2_9	3.889	39,11	2.006	2,03	113.810	420,14
Média	3.858	43,60	2.008	2,10	108.848	416,74

1.1.2. Material Genético A, Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

Viga (N)	Carga Máx. (Kgf)	Deform. Máx. (mm)	Carga LP (Kgf)	Deform. LP (cm)	MOE (Kgf/cm ²)	MOR (Kgf/cm ²)
A3_2	3.575	42,31	2.006	2,19	104.092	386,22
A3_3	3.369	32,07	2.003	1,89	120.244	363,97
A3_4	2.844	27,94	2.011	1,92	117.678	307,25
A3_5	3.817	44,14	2.000	2,15	105.761	412,37
A3_6	2.625	28,58	2.000	2,08	109.164	283,59
A3_7	3.717	38,94	2.011	1,84	123.865	401,56
A3_8	3.011	29,41	2.008	1,73	131.749	325,29
A3_9	3.914	42,32	2.003	1,96	116.015	422,85
Média	3.359	35,71	2.005	1,97	116.071	362,89

1.1.3. Material Genético B, Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

Viga (N)	Carga Máx. (Kgf)	Deform. Máx. (mm)	Carga LP (Kgf)	Deform. LP (cm)	MOE (Kgf/cm ²)	MOR (Kgf/cm ²)
B2_2	2.747	35,18	2.000	2,52	89.976	296,77
B2_3	2.267	29,21	2.003	2,51	90.722	244,91
B2_4	2.889	35,38	2.000	2,33	97.336	312,11
B2_5	3.158	38,60	2.000	2,25	100.700	341,17
B2_6	4.108	45,60	2.008	2,15	105.987	443,80
B2_7	3.311	35,05	2.011	2,10	108.617	357,70
B2_8	3.219	38,96	2.011	2,25	101.344	347,76
B2_9	4.386	49,52	2.014	1,92	118.956	473,84
Média	3.261	38,44	2.006	2,25	101.758	352,26

1.1.4. Material Genético B Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

Viga (N)	Carga Máx. (Kgf)	Deform. Máx. (mm)	Carga LP (Kgf)	Deform. LP (cm)	MOE (Kgf/cm ²)	MOR (Kgf/cm ²)
B3_2	4.069	39,18	2.000	1,84	122.987	439,59
B3_3	4.669	48,09	2.003	1,86	122.245	504,41
B3_4	4.925	49,60	2.011	1,73	131.970	532,07
B3_5	4.772	44,84	2.014	1,73	132.143	515,54
B3_6	4.772	47,24	2.017	1,75	130.829	515,55
B3_7	4.653	49,14	2.000	1,92	117.884	502,68
B3_8	4.019	31,55	1.917	1,66	130.918	434,19
B3_9	4.206	39,44	2.003	1,76	129.551	454,39
Média	4.511	43,64	1.996	1,78	127.303	487,30

1.2. Análise dos Valores Obtidos pelo Teste de Flexão Estática Destrutivo das Vigas Laminadas Coladas.

1.2.1. Material Genético A, Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

	Carga Máxima	Deform. Máx.	Carga LP	Deform. LP	MOE	MOR
	(Kgf)	(mm)	(Kgf)	(cm)	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)
Média (X)	3.858	43,60	2.008	2,10	108.848	416,74
Desvio Padrão (S)	375	5,94	7,07	0,11	5.583	40,47
Coef. de Variação (%)	9,7	13,6	0,3	5,2	5,1	9,71

1.2.2. Material Genético A, Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

	Carga Máxima	Deform. Máx.	Carga LP	Deform. LP	MOE	MOR
	(Kgf)	(mm)	(Kgf)	(cm)	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)
Média (X)	3.359	35,71	2.005	1,97	116.071	362,89
Desvio Padrão (S)	481	6,90	4,46	0,16	9.442	51,94
Coef. de Variação (%)	14,3	19,3	0,2	8,1	8,1	14,3

1.2.3. Material Genético B, Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

	Carga Máxima	Deform. Máx.	Carga LP	Deform. LP	MOE (000)	MOR
	(Kgf)	(mm)	(Kgf)	(cm)	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)
Média (X)	3.261	38,44	2.006	2,25	101.758	352,26
Desvio Padrão (S)	696	6,45	5,79	0,20	9.578	75,17
Coef. de Variação (%)	21,4	16,8	0,3	8,9	9,4	21,4

1.2.4. Material Genético B, Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

	Carga Máxima	Deform. Máx.	Carga LP	Deform. LP	MOE	MOR
	(Kgf)	(mm)	(Kgf)	(cm)	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)
Média (X)	4.511	43,64	1.996	1,78	127.303	487,30
Desvio Padrão (S)	355	6,37	32,43	0,09	5.448	38,37
Coef. de Variação (%)	7,9	14,6	1,6	5,1	4,3	7,9

ANEXO 2

TESTE DE TUKEY

2.1. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Destrutivo para as Vigas do Material Genético A e B.

2.1.1. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B3	8	127.303	A
A3	8	116.071	B
A2	8	108.848	B
B2	8	101.705	C

2.1.2. Carga Máxima.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B3	8	4.510	A
A2	8	3.857	A B
A3	8	3.359	B
B2	8	3.260	B

2.2. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo para as Emendas das Tábuas do Material Genético A.

2.2.1. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
A3	8	116.071	A
A2	8	108.848	A

2.2.2. Carga Máxima

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
A2	8	3.857	A
A3	8	3.359	A

2.3. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo para as Emendas das Tábuas do Material Genético B.

2.3.1. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B3	8	127.303	A
B2	8	101.705	B

2.3.2. Carga Máxima.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B3	8	4.510	A
B2	8	3.260	B

2.4. Teste de Tukey o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo das Tábuas do Material Genético A.

2.4.1. Densidade das Tábuas.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	21	0,76	A
3	120	0,71	B
2	423	0,67	C
1	423	0,61	D

2.4.2. Deformação das Tábuas no Limite Proporcional.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	21	0,63	A
3	120	0,62	A
2	423	0,52	B
1	423	0,56	B

2.4.3. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	21	168.179	A
3	120	160.701	A
2	423	153.607	A
1	423	145.913	A

2.5. Teste de Tukey o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo das Tábuas do Material Genético B.

2.5.1. Densidade das Tábuas.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	9	0,75	A
3	101	0,71	B
2	276	0,67	C
1	147	0,62	D

2.5.2. Deformação das Tábuas no Limite Proporcional.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
2	276	0,62	A
3	101	0,59	A B
1	147	0,57	A B
4	9	0,55	B

2.5.3. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	9	184.344	A
1	147	174.472	A B
3	101	155.175	B C
2	276	135.652	C

2.6. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Destrutivo dos Corpos de Prova do Material Genético A.

2.6.1. Densidade dos Corpos de Prova.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	25	0,73	A
3	26	0,68	B
2	28	0,63	C
1	41	0,57	D

2.6.2. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	25	171.380	A
3	26	154.538	B
2	28	147.396	B
1	41	131.510	C

2.6.3. Módulo de Ruptura (MOR).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	25	1.146,08	A
3	26	982,68	B
2	28	904,96	C
1	41	817,79	D

2.7. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Destrutivo dos Corpos de Prova do Material Genético B.

2.7.1. Densidade dos Corpos de Prova.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	64	0,76	A
3	29	0,68	B
2	14	0,63	C
1	5	0,58	D

2.7.2. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	64	177.014	A
3	29	152.693	B
2	14	133.909	B C
1	5	120.140	C

2.7.3. Módulo de Ruptura (MOR).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	64	1.222	A
3	29	999	B
2	14	833	C
1	5	819	C

2.8. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo para as Emendas das Tábuas do Material Genético A e B.

2.8.1. Módulo de Elasticidade.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
A2	156	150.015	A
B3	168	129.546	B
A3	156	115.944	C
B2	164	100.345	D

2.8.2. Deformação no Limite Proporcional

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B2	164	0,69	A
A3	156	0,60	B
A2	156	0,58	B
B3	168	0,54	C

2.9. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo para as Emendas das Tábuas do Material Genético A.

2.9.1. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
A2	156	150.015	A
A3	156	114.944	B

2.9.2. Deformação no Limite Proporcional.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
A2	156	0,58	A
A3	156	0,60	B

2.10. Teste de Tukey para o Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo para as Emendas das Tábuas do Material Genético B.

2.10.1. Módulo de Elasticidade (MOE).

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B3	168	129.546	A
B2	164	100.345	B

2.10.2. Deformação no Limite Proporcional.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
B2	164	0,69	A
B3	168	0,54	B

2.115. Teste de Tukey para o Peso das Tábuas do Material Genético A.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	105	5203	A
3	352	4807	B
2	421	4525	C
1	136	4139	D

2.12. Teste de Tukey para a Densidade das Tábuas do Material Genético A.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	105	0,74	A
3	352	0,68	B
2	421	0,64	C
1	136	0,58	D

2.13. Teste de Tukey para o Peso das Tábuas do Material Genético B.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	74	05171	A
3	270	4830	B
2	200	4524	C
1	19	4213	D

2.14. Teste de Tukey para a Densidade das Tábuas do Material Genético B.

Classes de Densidade	Frequência	Média	Tukey
4	74	0,73	A
3	270	0,68	B
2	200	0,63	C
1	19	0,59	D

ANEXO 3

CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA COMERCIAL DO HÍBRIDO DE
Eucalyptus urophylla x *Eucalyptus grandis* UTILIZADA NA
CONFECÇÃO DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS

3.1. Valores de Densidade das Tábuas.

3.1.1. Material Genético A.

Densidade (g/cm ³)	Peso Médio (g)	Frequência
0,53	3.782	3
0,54	3.854	4
0,55	3.927	6
0,56	3.990	15
0,57	4.060	17
0,58	4.127	24
0,59	4.207	32
0,60	4.272	36
0,61	4.349	44
0,62	4.419	58
0,63	4.490	82
0,64	4.558	116
0,65	4.631	121
0,66	4.698	111
0,67	4.773	91
0,68	4.844	50
0,69	4.912	59
0,70	4.983	41
0,71	5.055	28
0,72	5.123	23
0,73	5.203	17
0,74	5.276	13
0,75	5.344	10
0,76	5.410	7
0,78	5.537	4
0,79	5.616	2
0,80	5.708	1

* Dimensões das Tábuas: 2,54 x 11 x 255 cm.

* Umidade das Tábuas: 12%.

3.1.2. Material Genético B.

Densidade (g/cm ³)	Peso Médio (g)	Frequência
0,54	3.822	1
0,58	4.121	4
0,59	4.192	2
0,60	4.280	12
0,61	4.358	19
0,62	4.421	25
0,63	4.488	53
0,64	4.556	44
0,65	4.629	59
0,66	4.703	67
0,67	4.778	59
0,68	4.842	50
0,69	4.915	51
0,70	4.987	43
0,71	5.057	22
0,72	5.140	19
0,73	5.208	15
0,74	5.262	8
0,75	5.330	7
0,76	5.412	3

* Dimensões das Tábuas: 2,54 x 11 x 255 cm.

* Umidade das Tábuas: 12%.

3.2. Classes de Densidade das Tábuas.

3.2.1. Material Genético A.

Classe de Densidade	Frequência	%
0,50 a 0,60 g/cm ³	137	13
0,61 a 0,65 g/cm ³	421	41
0,66 a 0,70 g/cm ³	352	35
0,71 a 0,80 g/cm ³	105	10
Total	1.015	100

3.2.2. Material Genético B.

Classe de Densidade	Frequência	%
0,50 a 0,60 g/cm ³	19	3
0,61 a 0,65 g/cm ³	200	36
0,66 a 0,70 g/cm ³	270	48
0,71 a 0,80 g/cm ³	74	13
Total	563	100

3.3. Teste de Flexão Estática Destrutivo - Corpos de Prova Livres de Defeito (2 x 2 x 30 cm).

3.3.1. Material Genético A.

Classes de Densidade (g/cm ³)	Freq. (un.)	Carga Máxima * (Kgf)	MOR * (Kgf/cm ²)	MOE * (Kgf/cm ²)	Deform. Carga Máxima * (cm)	Teor de Umidade * (%)	Massa Específica (g/cm ³)
0,50 -0,60	41	154	818	131.510	6,99	12,5	0,57
0,61 - 0,65	28	170	905	147.396	6,76	12,6	0,63
0,66 - 0,70	26	185	983	154.538	7,14	12,6	0,68
0,71 - 0,80	25	215	1.146	171.380	7,25	12,6	0,74

* Valores Médios por Classe de Densidade.

3.3.2. Material Genético B.

Classes de Densidade (g/cm ³)	Freq. (un.)	Carga Máxima * (Kgf)	MOR * (Kgf/cm ²)	MOE * (Kgf/cm ²)	Deform. Carga Máxima * (cm)	Teor de Umidade * (%)	Massa Específica (g/cm ³)
0,50 -0,60	5	154	819	120.140	7,3	12,5	0,58
0,61 - 0,65	14	156	833	133.909	6,7	12,3	0,63
0,66 - 0,70	29	188	999	152.693	7,7	12,2	0,68
0,71 - 0,80	64	229	1.222	177.014	8,4	12,0	0,75

* Valores Médios por Classe de Densidade.

3.3.3. Valores Máximos e Mínimos do Teste de Flexão Estática Destrutivo dos Corpos de Prova Livres de Defeito do Material Genético A.

Classe de Densidade 1 (0,50 a 0,60 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	136	715	105.300	3,3	11,3
Máximo	208	1.118	181.500	10,9	13,2

Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	124	662	107.400	4,2	11,0
Máximo	264	1.388	201.600	11,4	13,4

Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	132	691	11.700	5,5	12,5
Máximo	253	1.326	195.500	10,9	15,9

Classe de Densidade 4 (0,70 a 0,80 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	138	747	120.200	5,3	11,6
Máximo	242	1.270	191.600	10,5	13,2

Geral_A

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	124	662	105.300	3,3	11,0
Máximo	264	1.388	201.600	11,4	15,9

3.3.4. Valores Máximos e Mínimos do Teste de Flexão Estática Destrutivo dos Corpos de Prova do Material Genético B.

Classe de Densidade 1 (0,50 a 0,60 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	119	626	91.230	3,3	11,6
Máximo	268	1.408	212.400	11,4	13,2

Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	135	733	108.200	4,6	10,5
Máximo	235	1.273	195.800	11,4	12,6

Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	161	851	122.500	4,1	10,5
Máximo	254	1.338	182.000	11,4	13,9

Classe de Densidade 4 (0,70 a 0,80 g/cm³).

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	151	807	129.500	4,8	11,3
Máximo	283	1.502	209.400	13,6	13,3

Geral_B

Valores	Carga Máxima *	MOR *	MOE *	Deform. Carga Máxima *	Teor de Umidade *
	(Kgf)	(Kgf/cm ²)	(Kgf/cm ²)	(cm)	(%)
Mínimo	119	626	91.230	3,35	10,54
Máximo	283	1.502	212.400	13,61	13,9

3.4. Teste de Flexão Estática Não-Destrutivo das Tábuas.

3.4.1. Material Genético A.

Classes de Densidade	Densidade*	Carga Aplicada*	Carga Aplicada*	Deformação*	MOE*	Frequência*
(g/cm ³)	(g/cm ³)	(Kpa)	(Kgf)	(cm).	(Kg/cm ²)	(un)
0,50 a 0,60	0,58	60	76	0,59	141.134	129
0,61 a 0,65	0,64	60	76	0,55	149.440	414
0,66 a 0,70	0,67	60	76	0,53	154.601	344
0,71 a 0,80	0,73	80	100	0,67	163.101	100

* Valores Médios por Classe de Densidade.

3.4.1. Material Genético B.

Classes de Densidade	Densidade*	Carga Aplicada*	Carga Aplicada*	Deformação*	MOE*	Frequência*
(g/cm ³)	(g/cm ³)	(Kpa)	(Kgf)	(cm).	(Kg/cm ²)	(un)
0,50 a 0,60	0,59	53	67	0,50	144.516	14
0,61 a 0,65	0,64	57	72	0,57	179.795	191
0,66 a 0,70	0,68	75	95	0,63	123.682	259
0,71 a 0,80	0,73	75	95	0,59	174.968	68

* Valores Médios por Classe de Densidade.

3.5. Valores Médios por Classe de Densidade do Teste de Flexão Estática Não-Destrutivo das **Emendas** das Lâminas.

Material Genético	Classe de Densidade (g/cm³)	Deformação LP* (cm)	MOE* (Kgf/cm²)	Frequência (tábuas)
A	0,61 a 0,65	0,58	150.015	93
A	0,66 a 0,70	0,60	114.944	93
B	0,61 a 0,65	0,69	100.345	97
B	0,66 a 0,70	0,54	129.546	99

* Valores Médios por Classe de Densidade.

3.5.1. Valores Máximos e Mínimos para o Material Genético A.

Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³)

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	C.V.	t	Pr > t
MOE	156	110.248	195.439	150.015	18.594	12,40	100,77**	0,0001
Deformação LP	156	0,44	0,78	0,58	0,07	12,35	101,12**	0,0001

Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³)

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	C.V.	t	Pr > t
MOE	156	84.057	151.303	114.944	13.477	11,72	106,53**	0,0001
Deformação LP	156	0,45	0,81	0,60	0,07	12,26	101,92**	0,0001

3.5.2. Valores Máximos e Mínimos para o Material Genético B.

Classe de Densidade 2 (0,61 a 0,65 g/cm³)

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	C.V.	t	Pr > t
MOE	164	68.774	144.865	100.344	14.002	13,95	91,78**	0,0001
Deformação LP	164	0,47	0,99	0,69	0,10	14,54	88,05**	0,0001

Classe de Densidade 3 (0,66 a 0,70 g/cm³)

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	C.V.	t	Pr > t
MOE	168	0,35	0,80	0,54	0,09	16,17	84,18**	0,0001
Deformação LP	168	85.108	194.533	129.545	19.946	16,17	80,16**	0,0001

ANEXO 4

EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE (MOE) DAS VIGAS LAMINADAS COLADAS EM
FUNÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DAS TÁBUAS

4.1. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Vigas Laminadas Coladas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético A.

4.1.1. Em Função da Densidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = 87.508,99 + 41.710,11 * DENSIDADE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	68,49	21,34	0,38	455 **
Pr > t	0,0001	0,0001		

4.1.2. Em Função do Módulo de Elasticidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = 112.768 + 0,013113 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	215	3,821	0,02	14,60 **
Pr > t	0,0001	0,0001		

4.2. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Vigas Laminadas Coladas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético B.

4.2.1. Em Função da Densidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = - 2.999,58 + 193.743 * DENSIDADE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	- 0,730	31,081	0,68	966 **
Pr > t	0,4658	0,0001		

4.2.2. Em Função da Densidade e do Módulo de Elasticidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = 29.927 + 155.408 * DENSIDADE_{TÁBUA} - 0,052115 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	5,99	22,66	- 9,91	0,74	635 **
Pr > t	0,0001	0,0001	0,0001		

4.2.3. Em Função do Módulo de Elasticidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = 142.204 - 0,119405 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	148,69	-18,87	0,44	356 **
Pr > t	0,0001	0,0001		

4.3. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Vigas Laminadas Coladas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético A e B.

4.3.1. Em Função da Densidade das Tábua.

$$MOE_{VIGA} = -42.227 + 249.140 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	-4,39	17,24	0,51	297**
Pr > t	0,0001	0,0001		

4.3.2. Em Função da Densidade e Módulo de Elasticidade das Tábuas.

$$MOE_{VIGA} = -20.325 + 243.122 * DENSIDADE_{TABUA} - 0,1509 * MOE_{TABUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	-1.950	17,33	-4,636	0,54	169**
Pr > t	0,05	0,0001	0,0001		

4.4. Critérios para a Seleção do Modelo de Regressão.

Analisar os seguintes fatores conjuntamente:

- A. Coeficiente de Determinação R²: quanto mais próximo de 1 melhor;
- B. Teste F: quanto mais próximo de 0 mais significativo;
- C. Teste t para os parâmetros da Equação: quanto mais próximo de 0 mais significativo;
- D. Análise dos Resíduos: Eliminar os Pontos Outlier para melhorar o ajuste do Modelo.

ANEXO 5

CONSIDERAÇÕES SOBRE O EQUIPAMENTO DE
CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO-DESTRUTIVO
STRESS GRADING: MK III TIMBER GRADER, POLAK
ENGINEERING, ÁFRICA DO SUL

O equipamento Stress-Grading: MK III Timber Grader é uma máquina pneumática para classificação mecânica não-destrutiva de madeira, com carga controlada manualmente.

A tábua, ou qualquer outra peça de madeira, deve ser apoiada nos cilindros inferiores que atuam como apoios. Dependendo da necessidade e da peça de madeira a ser testada, os cilindros superiores podem ser abaixados, prendendo, desta forma, a peça. A carga é aplicada no centro da peça através do conjunto pistão-cilindro; nesse momento, a pressão exercida sobre ela é registrada em um manômetro, em quilo-pascal (KPa), bem como, sua deformação em um deflectômetro, em milímetros (mm).

A pressão não é registrada em uma unidade do Sistema Internacional. Para calcular a carga a ser aplicada em unidades desse sistema é necessário saber a área do pistão, por ser a pressão e a carga diretamente relacionadas a ela.

A seguir, é apresentada essa seqüência de cálculo.

Fatores de Conversão:

$$1 \text{ KPa} = 1.000 \text{ N} / \text{m}^2.$$

$$1 \text{ Kgf} = 9,80665 \text{ N}.$$

Área do Pistão (A):

$$\text{Diâmetro do Pistão (D)} = 12,56 \text{ cm}.$$

$$\text{Área do Pistão (A)} = \pi * D^2 / 40.000.$$

$$A = 123,9 \text{ cm}^2$$

$$A = 0,01239 \text{ m}^2.$$

Pressão:

Pressão (P) = Força (F) / Área (A).

$$P = 10 \text{ KPa} = 10.000 \text{ N} / \text{m}^2.$$

$$A = 0,01239 \text{ m}^2.$$

$$F = P * A = 10.000 * 0,01239 = 123,9 \text{ N}.$$

$$F = P * A = \text{N} / \text{m}^2 * \text{m}^2 = \text{N}.$$

$$F = 123,9 / 9,80665 = 12,63 \text{ Kgf}.$$

Portanto, uma pressão marcada no manômetro do equipamento de **10KPa** corresponde a uma carga aplicada pelo pistão de **12,63 Kgf**.

Exemplo de Cálculo:

Carga no Limite Proporcional:

$$F_{LP} = 163 \text{ Kgf}.$$

$$F_{LP} = 163 * 9,80665 = 1.598,48 \text{ N}.$$

$$P = F_{LP} / A = 1.598,48 / 0,01239 = 129.014,04 \text{ N} / \text{m}^2.$$

$$P = 129.014,04 / 1.000 = 129 \text{ KPa}.$$

Ou simplesmente:

$$P = 10 \text{ KPa} * 163 \text{ Kgf} / 12,63 \text{ Kgf}$$

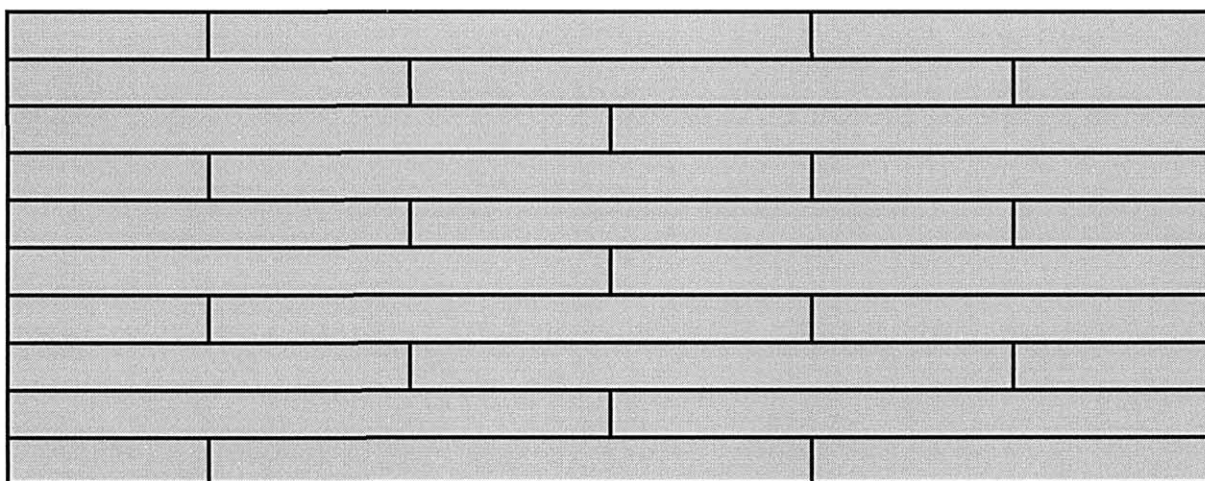
$$P = 129 \text{ KPa}.$$

ANEXO 6

DISPOSIÇÃO DAS EMENDAS NAS VIGAS

MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMAR O
MÓDULO DE ELASTICIDADE DA EMENDA EM FUNÇÃO DAS
CARACTERÍSTICAS DAS TÁBUAS

6.1. Posicionamento das Emendas nas Tábuas para a Composição das Vigas Laminadas Coladas.



0,67 m	2,0 m	1,32 m
1,32 m	2,0 m	0,67 m
2,0 m	2,0 m	
4,0 m		

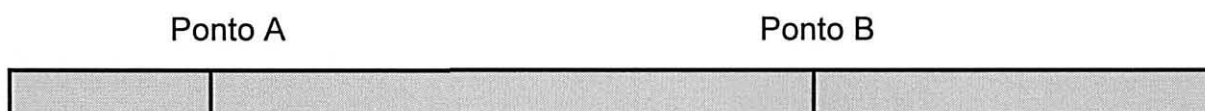
* Separação entre emendas: 24 vezes a espessura da lâmina nas seções onde os esforços são próximos aos admissíveis, podendo variar a separação em função dos esforços atuantes. (FREAS & SELBO, 1954).

* Espessura da Lâmina * 24 = 2,5 cm * 24 = 60 cm = 0,60 m.

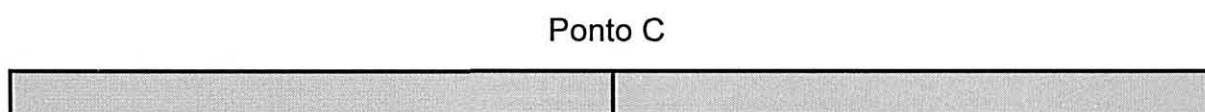
* Comprimento da Viga (4,0 m) / 6 partes = 0,67 m.

6.2. Pontos de Aplicação da Carga para a Realização do Teste de Flexão de Flexão Estática Não-Destrutivo.

6.2.1. Emenda Tipo 1.



6.2.2. Emenda Tipo 2.



6.3. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Emendas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético A e B.

6.3.1. Em Função da Densidade da Tábua e da Carga Aplicada no Limite Proporcional.

$$MOE_{EMENDA} = 422.782,52 - 240.000,15 * DENS_{TÁBUA} - 1.731,22 * CARGA_{LP}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
F	625	128	599	0,33	300**
Pr > F	0,0001	0,0001	0,0001		

6.3.2. Em Função da Densidade da Tábua e do Módulo de Elasticidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 67.152 + 362.305 * DENS_{TÁBUA} - 0,1261 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	-4,9	18,7	-6,5	0,28	234**
Pr > t	0,001	0,0001	0,0001		

6.3.3. Em Função da Densidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 104.359 + 390.204 * DENSIDADE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	-8,3	20,3	0,25	411**
Pr > t	0,0001	0,0001		

6.4. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Emendas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético A.

6.4.1. Em Função da Densidade da Tábua e do Módulo de Elasticidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 26.067 + 261.040 * DENS_{TÁBUA} + 0,056322 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	-2,0	12,9	2,0	0,20	96**
Pr > t	0,04	0,0001	0,04		

6.4.2. Em Função da Densidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 23.335 + 269.945 * DENSIDADE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	-1,8	13,7	0,20	187**
Pr > t	0,07	0,0001		

6.5. Modelo de Regressão Linear para Estimar o Módulo de Elasticidade das Emendas em Função da Classificação Mecânica das Tábuas - para o Material Genético B.

6.5.1. Em Função da Densidade da Tábua e do Módulo de Elasticidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 140.500 + 474.202 * DENS_{TÁBUA} - 0,157758 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros					
Nível de Significância	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	F
t	-4,6	11,3	4,9	0,41	156**
Pr > t	0,0001	0,0001	0,0001		

6.5.2. Em Função da Densidade da Tábua.

$$MOE_{EMENDA} = - 240.173 + 590.246 * DENSIDADE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	-10,2	16,6	0,38	275**
Pr > t	0,0001	0,0001		

6.5.3. Em Função do Módulo de Elasticidade da Tábua

$$MOE_{EMENDA} = 202.094 - 0,363081 * MOE_{TÁBUA}$$

Parâmetros				
Nível de Significância	B ₀	B ₁	R ²	F
t	44,4	-12,1	0,24	145**
Pr > t	0,0001	0,0001		

6.6 Valores Médios de Resistência das Emendas por Classes de Densidade obtidos Através do Ensaio de Flexão Estática Não-Destrutivo.

Classe de Vigas	Carga LP (Kgf)	Deformação LP (mm)	MOE (Kgf/cm ²)
A2	63	5,8	150.015
A3	63	6,0	145.174
B2	63	6,9	126.735
B3	63	5,4	163.616

ANEXO 7

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS GENÉTICOS UTILIZADOS NOS TESTES PRELIMINARES

7.1. Características dos Materiais Genéticos Coletados para a Realização dos Testes Preliminares.

Material Genético	Povoamento			Árvore Coletada		
	Local	Espaçamento (m)	Idade (anos)	Dap (cm)	Alt. Com. (m)	Alt. Total (m)
1	SP	3 x 2	8,5	18,5	25,0	29,3
2	SP	3 x 2	10	19,5	26,2	30,4
3	SP	3 x 3	10	22,0	30,7	34,4
4	SP	3 x 2	9	17,5	25,3	30,3
5	SP	3 x 2	9	17,5	24,1	29,0
6	MS	3 x 2	8	16,5	22,5	26,1
7	MS	3 x 2	8	15,5	20,3	25,7
8	MS	3 x 2	8	16,0	22,4	26,3

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

7.2. Valores de Massa Específica Média (g/cm³) dos Materiais Genéticos.

Material Genético	ME verde (g/cm ³)	ME 12% (g/cm ³)	ME 0% (g/cm ³)
1	0,97	0,65	0,61
2	1,00	0,80	0,75
3	1,01	0,74	0,69
4	0,96	0,68	0,64
5	0,96	0,74	0,66
6	0,99	0,72	0,67
7	0,98	0,70	0,63
8	1,05	0,82	0,77
Média Geral	0,99	0,73	0,68

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

7.3. Valores de Anisotropia de Contração, Anisotropia de Inchamento e Coeficiente de Retratabilidade.

Material Genético	Anisotropia		Coeficiente de Retratabilidade		
	Contração	Inchamento	Radial	Tangencial	Longitudinal
1 (H)	1,4	1,5	0,23	0,24	0,027
2 (G)	1,1	1,1	0,27	0,23	0,026
3 (H)	1,4	1,4	0,22	0,23	0,022
4 (H)	1,5,	1,6	0,23	0,25	0,016
5 (H)	1,7	1,8	0,24	0,30	0,019
6 (H)	1,9	2,0	0,17	0,25	0,020
7 (S)	2,0	2,2	0,15	0,23	0,019
8 (H)	1,5	1,6	0,22	0,24	0,013
Média	1,6	1,6	0,22	0,25	0,020

* H: híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*; G: *E. grandis*; S: *E. saligna*.

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

7.4. Valores de Contração e Inchamento Volumétricos.

Material Genético	Contração	Inchamento
	Volumétrica (%)	Volumétrico (%)
1	15,4	18,2
2	16,1	19,3
3	14,8	17,5
4	16,5	19,9
5	19,3	23,9
6	17,4	21,0
7	15,2	17,9
8	17,1	20,7
Média	16,5	19,8

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

7.5. Valores de Contração e Inchamento Longitudinal, Tangencial e Radial.

Material Genético	Contração (%)			Inchamento (%)		
	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial
1	0,33	9,39	6,34	0,33	10,36	6,78
2	0,57	8,65	7,67	0,58	9,48	8,33
3	0,44	8,82	6,23	0,44	9,67	6,65
4	0,41	10,20	6,70	0,41	11,36	7,20
5	0,37	12,61	7,30	0,38	14,44	7,88
6	0,56	11,65	5,98	0,56	13,19	6,36
7	0,45	10,24	5,10	0,45	11,42	5,37
8	0,37	10,55	7,01	0,38	11,80	7,54
Média	0,44	10,26	6,54	0,44	11,46	7,01

* 1 e 4 : materiais genéticos selecionados.

7.6. Programa de Secagem Testado para os Oito Materiais Genéticos.

Umidade da Madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade Relativa (%)	Tempo (Horas)
	Bulbo Seco	Bulbo Úmido		
Vaporização Inicial	100	100	100	2
Verde a 50	45	43	89	24
50 a 40	45	42	83	48
40 a 35	45	41	78	60
35 a 25	50	43	65	48
25 a 17	60	50	59	48
17 a 10	70	52	40	48
10 a 6	80	60	39	24
Vaporização Final	100	100	100	4

* Fonte: MELLADO, 1993.

7.7. Densidade Básica da Árvore Determinados a Partir de Diversos Discos Retirados a Várias Alturas da Árvore.

Material Genético	Corpo de Prova	Densidade Básica (g/cm ³)	Material Genético	Corpo de Prova	Densidade Básica (g/cm ³)
1	100	0,81	5	100	0,63
	75	0,65		75	0,62
	50	0,59		50	0,60
	25	0,53		25	0,54
	0	0,63		0	0,47
Média		0,64	Média		0,57
2	100	0,75	6	100	0,70
	75	0,73		75	0,62
	50	0,69		50	0,57
	25	0,69		25	0,63
	0	0,59		0	0,58
Média		0,69	Média		0,62
3	100	0,62	7	100	0,66
	75	0,56		75	0,66
	50	0,54		50	0,59
	25	0,53		25	0,63
	0	0,48		0	0,55
Média		0,55	Média		0,62
4	100	0,59	8	100	0,76
	75	0,77		75	0,76
	50	0,80		50	0,72
	25	0,58		25	0,66
	0	0,48		0	0,57
Média		0,64	Média		0,69

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALEXANDER, J. A.; ANTON, A. Mechanical grading of South Eastern Australia hardwoods. In: **Forest Products Research Conference**, 18. Highett, 1977. Contributed Papers. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Static tests of timbers in structural sizes**. ASTM D 198-67. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, 1967. part 16.

APA - The Engineered Wood Association. **Glued-laminated beams production**. Washington, 1997.

BARTZ, A. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e *P. Elliottii*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO (2. : 1973 : Curitiba). **Anais**. Curitiba: FIEP, 1974. p. 275-77.

BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v.28, n.10, p. 61-72, 1978.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhol, 1982. 711 p.

BOHANNAN, B. Effect of size on bending strength of wood members. ESFS. **Research Paper FPL -56**, 1966. 30 p.

BOLAND, D. J. et al. **Forest trees of Australia**. 4. ed. Australia Government Publishing Service: CSIRO, 1992.

BOLETIM TÉCNICO Características Físicas e Mecânicas de Eucalipto.
KLABIN FABRICADORA DE PAPEL S.A., 1998.

BOSTRÖM, L. A. Comparison between four different timber strength grading machine. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD (9. : 1994 : Madison). **Proceedings**. Madison, Wisconsin: Forest Products Society, 1994. p.157-67.

BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ao nível do Dap. **IPEF**, Piracicaba, n. 4, p. 81-91, 1972.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

CALLIA, V. W. Madeira laminada colada de pinho do Paraná, seu emprego nas estruturas. **USP. Publicação n. 1 da cadeira n. 13**. São Paulo, 1961.

CAMPINHOS, E. N. **Análise de QTL's em *Eucalyptus grandis*: estabilidade da expressão, mapeamento, localização e preservação de folhas para análise RAPD**. Viçosa, 1996. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa.

CARRASCO, E.V. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos, 1989. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CHUNG, W. A. **Glulam: the theory and practice of the manufacture of glued-laminated timber structures**. London: Ernest Benn, 1964. 423 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY Wood Handbook. **Basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification.** USDA, Washington D.C., 1987. 466 p.

FREAS, A. D.; SELBO, M. L. Fabrication and design principles of glued laminated wood structural members. **Technical Bulletin FPL USDA.** Forest Service, Washington, n. 1069, p. 1-220, feb. 1954.

GERHARDS, C.C. Dependence of MOE on strength ratio and specific gravity: 4 inch thick southern Pine. **Forest Products Journal**, Madison, v. 20, n. 6, p. 37-38, jun. 1970.

HELLMEISTER, J. C. **Madeira: determinação de suas características.** São Carlos: USP-EESC/Departamento de Estruturas, 1987.

HOYLE Jr., R. J. A. Nondestructive test for Stiffness. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 1, n. 6, p. 251-254, 1961.

KRAMER, P. R. Correlation of bending strength and Stiffness of southern Pine. **Forest Products Journal**, v. 14, n. 10, 495-496, 1964.

KOLLMANN, F. F. P. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones.** Madrid: Instituto Florestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera, 1959. 675 p.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JR., W. A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer, 1968. v. 2.

LAHR, F. A. R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira.** São Carlos, 1983. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- _____. Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada. In: EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA (4. : 1992 : São Carlos). **Anais**. São Carlos, 1992. v. 3. p. 13-20.
- MACEDO, A. N. **Emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- MANTILLA C., E. V. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada (MLC)**. São Carlos, 1989. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- MATSUNAGA, D. K. **Avaliação da utilização de madeira comercial de *Pinus taeda* L. e da adequabilidade da norma européia unificada (CEN), à construção de vigas laminadas coladas**. Curitiba, 1995. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) - Setor de Ciência Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- MELLADO, E. C. E. R. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. Curitiba, 1993. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) - Setor de Ciência Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- MODDY, R. C.; BOHANNAN, B. Flexural properties of glued-laminated southern pine beams-finger joints and specific gravity effects. **USFS. Research Paper FPL - 151**, 1971. 36 p.
- NEWLIN, J. A.; TRAYER, G. W. Form factors of beams subjected to transversal loading only. **National Advisory Committee for Aeronautics Report. n. 181**, 1924.

- PFEIL, W. **Estruturas da madeira**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994. 295 p.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review. **General Technological Report. FPL.** USDA. Forest Service Madison., Wisc., n. 70, p. 1-40, May, 1994.
- RHUDE, A. J. Structural glued laminated timber: history of its origins and early development. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 46, n. 1, p. 15-22, Jan. 1996.
- SANTINI, E. J. **Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* provenientes de plantios de rápido crescimento**. Curitiba: FUPEF, 1980.
- SENF, J. F.; DELLA LUCIA, R. M. Increased utilization of tropical hardwood through species - independent structural grading. **Forest Products Journal**, v. 29, n. 6, p. 22-28, 1979.
- SIMIONI, A. **Sobre a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de *Pinus elliottii* Engelm.** Curitiba, 1978. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) - Setor de Ciência Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SOUZA, V. R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELLO, L. E. G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, 1986.
- SZÜCS, C.A. Entalhes múltiplos. determinação da geometria, da pressão de colagem e do enfraquecimento causado. In: EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA (4. : 1992: São Carlos). **Anais**. São Carlos, 1992. v. 3. p. 21-31.

TANAAMI, R. G. **Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e elasticidade à flexão da madeira.** São Carlos, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos materiais.** Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1971. 571 p. v. 2.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood, structure, properties, utilization.** New York: Chapman e Hall, 1991. 498 p.

WANGAARD, F. F. **The mechanical properties of wood.** New York: J. Wiley, 1950. 377 p.

ZANDER, J. R. T. **Cálculo e execução de estruturas de madeira laminada.** São Carlos, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.